



TUGAS AKHIR - TE 141599

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI
MODUL PENGUJIAN FERORESONANSI
PADA TRANSFORMATOR TEGANGAN RENDAH**

**Neisya Islamey Rifma
NRP 07111440000029**

**Dosen Pembimbing
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST. M.Sc.
IGN Satriyadi Hernanda, ST. MT.**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018**



FINAL PROJECT - TE 141599

**DESIGN AND IMPLEMENTATION
OF FERRORESONANCE TEST MODULE
ON LOW VOLTAGE TRANSFORMER**

Neisya Islamey Rifma
NRP 07111440000029

Supervisors
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST. M.Sc.
IGN Satriyadi Hernanda, ST. MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul **DESAIN DAN IMPLEMENTASI MODUL PENGUJIAN FERORESONANSI PADA TRANSFORMATOR TEGANGAN RENDAH** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juni 2018



Neisya Islamey Rifma
0711144000029

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI
MODUL PENGUJIAN FERORESONANSI
PADA TRANSFORMATOR TEGANGAN RENDAH**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST, M.Sc. IGN Satriyadi Hernanda, ST, MT.
NIP. 1970 0712 1998 02 1001 NIP. 1973 0123 2002 12 1001



Halaman ini sengaja dikosongkan

DESAIN DAN IMPLEMENTASI MODUL PENGUJIAN FERORESONANSI PADA TRANSFORMATOR TEGANGAN RENDAH

Nama mahasiswa : Neisya Islamey Rifma
Dosen Pembimbing I : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST. M.Sc.
Dosen Pembimbing II : IGN Satriyadi Hernanda, ST. MT.

ABSTRAK

Fenomena feroresonansi adalah suatu fenomena yang biasanya terjadi pada transformator yang diseri dengan kapasitor. Rangkaian ini akan menimbulkan tegangan lebih beresilasi pada transformator saat dipicu kejadian transien. Kejadian transien seperti hubung singkat, pengoperasian pemutus daya (*switching*), dan petir, ini memicu peralihan sistem secara tiba-tiba sehingga memberikan dampak buruk bagi transformator dan sistem. Pada studi ini, perancangan modul pengujian feroresonansi dilakukan untuk mendapatkan karakteristik fisik feroresonansi. Perancangan dimulai dengan pemilihan *range* kapasitansi dengan pendekatan *Rudenburg's graphical method* berdasarkan kurva magnetisasi transformator. Modul langsung diimplementasi pada transformator satu fasa 110 V jenis inti H dan M. Variasi tegangan sumber, variasi nilai kapasitansi dan variasi konfigurasi dilakukan pada pengujian ini. Respon feroresonansi di tegangan transformator akan di lihat spektrum harmonisa dan besar THD untuk mengklasifikasi mode-mode feroresonansi yang muncul. Hasil menunjukkan mode fundamental mendominasi bentuk feroresonansi yang muncul pada pengujian ini, dengan THD terbesar 26,55 % dimiliki oleh transformator inti H dengan kapasitor 10 uF di konfigurasi seri. Sementara mode subharmonic muncul pada konfigurasi seri-paralel (*Cseries* 70 uF dan *Cshunt* 30 uF) di transformator inti M dengan THD maksimum sebesar 34.99 %.

Kata kunci: (*modul pengujian feroresonansi, transformator, karakteristik fisik feroresonansi*)

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF FERRORESONANCE TEST MODULE ON LOW VOLTAGE TRANSFORMER

Student Name : Neisya Islamey Rifma
Supervisor I : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST. M.Sc.
Supervisor II : IGN Satriyadi Hernanda, ST. MT.

ABSTRACT:

Ferroresonance is a phenomenon that usually occurs in a series circuit between transformer and capacitor. This circuit will cause oscillating overvoltage on the transformer when triggered by transient events. Transient events such as short circuit, switching operation, and lightning, this triggers a sudden transition of the system to adversely affect transformers and systems. In this final project, the design of ferroresonance testing module is used to obtain the physical characteristics of ferroresonance. The design begins with the selection of capacitance range with Rudenburg's graphical method approach based on the transformer magnetization curve. The module is directly implemented on a single phase 110 V transformer type of core H and M. Voltage source variation, capacitance value variation and configuration variation are performed on this test. The ferroresonance response at the transformer voltage will see the harmonic and large spectrum of THD to classify the emerging ferroresonance modes. The results show that the fundamental mode dominates the ferroresonance form that appears in this test, with the largest THD of 26.55 % owned by the H core transformer with a 10 μF capacitor in the series configuration. While subharmonic mode appears in the parallel-series configuration (C_{series} 70 μF and C_{shunt} 30 μF) in the core transformator M with a maximum THD of 34.99 %.

Key Word: *(ferroresonance test module, transformator, ferroresonance physical characteristics)*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul **DESAIN DAN IMPLEMENTASI MODUL PENGUJIAN FERORESONANSI PADA TRANSFORMATOR TEGANGAN RENDAH**.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya.
2. Bapak Arief Erwan Wimanda dan Ibu Erma Farianti sebagai orangtua penulis atas doa dan cinta yang tak henti pada penulis dalam keadaan apapun. Semoga Allah SWT senantiasa melindungi dan memberi mereka tempat terbaik kelak di surgaNya.
3. Bapak Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST. M.Sc. dan IGN Satriyadi Hernanda, ST. MT. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
4. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan menciptakan suasana belajar yang luar biasa.
5. Keluarga besar asisten dan dosen Laboratorium Tegangan Tinggi Teknik Elektro ITS yang senantiasa membantu dan berdiskusi dalam proses penyelesaian tugas akhir ini.
6. Rosima Wati Dewi, Dwi Indah Apriany, Angga Prasetya untuk selalu ada dan selalu mendukung serta mengingatkan untuk tetap berusaha terus-menerus.
7. Tyas Maharani, Qumi Lailatul, Arum Mukti, Inasdiah Farras, dan Della Maily sebagai tim pengisi semangat selama menjalani perkuliahan.
8. Teman-teman seperjuangan e54 yang telah menemani dan memberikan dukungan selama masa kuliah sampai penyusunan tugas akhir ini.

Penulis telah berusaha maksimal dalam penyusunan tugas akhir ini. Namun tetap besar harapan penulis untuk menerima saran dan kritik

untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat yang luas.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	xiii
BAB 1	PENDAHULUAN..... 1
1.1	Latar Belakang 1
1.2	Sistematika Penulisan 3
BAB 2	KAJIAN PUSTAKA 5
2.1	Kajian Penelitian Terkait 5
2.2	Teori Dasar..... 5
2.1.1	Transformator..... 5
2.1.2	Feroresonansi 8
BAB 3	PERANCANGAN ALAT EKSPERIMEN, PENGUJIAN DAN PENGOLAHAN DATA..... 15
3.1	Perancangan <i>Hardware</i> Modul Pengujian..... 17
3.1.1	Transformator Satu Fasa 17
3.1.2	Kapasitor 18
3.1.3	MCB 18
3.1.4	Sensor Tegangan Verivolt..... 18
3.1.5	CT Clamp HIOKI 3283 19
3.1.6	Alat Perekam Tegangan NI DAQ..... 19
3.2	<i>No-Load Test</i> Transformator (Pengujian Kurva Magnetisasi) 22
3.3	Penentuan Nilai Kapasitansi..... 25
3.4	Pengujian dan Pengolahan Data 28

BAB 4	HASIL PENGUJIAN DAN ANALISA.....	33
4.1	Pengujian Feroresonansi pada Konfigurasi Seri	33
4.1.1	Tegangan Permulaan Feroresonansi Akibat Perbedaan Tipe Jenis Inti Transformator.....	33
4.1.2	Distorsi Gelombang Tegangan Transformator sebagai Respon Feroresonansi Akibat Variasi Kapasitor	36
4.1.3	<i>Jump Phenomenon</i> pada Pengukuran Transformator	40
4.2	Pengujian Feroresonansi pada Konfigurasi Seri-Paralel	45
4.2.1	Tegangan sumber \geq tegangan rating transformator untuk mendapatkan respon feroresonansi.....	45
4.2.2	Perbandingan <i>Cseries+Cshunt</i> dan <i>Cthevenin</i> dalam mendapatkan respon feroresonansi	48
4.2.3	Pengaruh ratio <i>Cseries</i> dan <i>Cshunt</i> terhadap munculnya respon feroresonansi.....	52
4.3	Spektrum Harmonisa dan besar THD dalam feroresonansi.....	55
BAB 5	KESIMPULAN	67
5.1	Kesimpulan.....	67
5.2	Saran	68
DAFTAR PUSTAKA		69
BIODATA PENULIS		71

TABLE OF CONTENT

TITLE	
STATEMENT SHEET	
APPROVAL SHEET	
ABSTRAK	i
ABSTRACT:	iii
ACKNOWLEDGEMENT	v
TABLE OF CONTENT	vii
LIST OF FIGURES	ix
LIST OF TABLES	xiii
CHAPTER 1 PREFACE	1
1.1 Background	1
1.2 Systematic of Report Writing	3
CHAPTER 2 LITERATURE REVIEW	5
2.1 Related Research Study	5
2.2 Basic Theory	5
2.1.1 Transformer	5
2.1.2 Ferroresonance	8
CHAPTER 3 EXPERIMENT TOOLS DESIGN, TEST, AND DATA PROCESSING	15
3.1 Design of Tools Testing Modul	17
3.1.1 One Phase Transformer	17
3.1.2 Capasitor	18
3.1.3 MCB	18
3.1.4 Verivolt	18
3.1.5 CT Clamp HIOKI 3283	19
3.1.6 NI DAQ 9223	19
3.2 <i>No-Load Test</i> Transformer (Magnetization Curve Test)	22
3.3 Determination of Capacitance Range	25
3.4 Testing and Data Processing	28

CHAPTER 4 ANALYSIS AND RESULT OF TEST.....	33
4.1 Ferroresonance Test in Series Configuration.....	33
4.1.1 Inception Voltage Ferroresonance from Transformer Core Type's Difference	33
4.1.2 Voltage Wave Transformer Distortion as Ferroresonance response to Capacitance Variation.....	36
4.1.3 <i>Jump Phenomenon</i> on Transformer Measurement	40
4.2 Ferroresonance Test in Series-Parallel Configuration.....	45
4.2.1 Input Voltage \geq Rated Transformer Voltage as for obtaining Ferroresonance response.....	45
4.2.2 Comparison between <i>Cseries</i> + <i>Cshunt</i> and <i>Cthevenin</i> to obtain Ferroresonance response.....	48
4.2.3 Influnce of <i>Cseries</i> and <i>Cshunt</i> ratio to the appearance of Ferroresonance response.....	52
4.3 Harmonic Spektrum and value of THD in Ferroresonance.....	55
CHAPTER 5 CLOSING	67
5.1 Conclusion.....	67
5.2 Recommendation For Next Research	68
BIBLIOGRAPHY	69
BIOGRAPHY OF AUTHOR.....	71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Konstruksi transformator [7].....	6
Gambar 2.2	Rangkaian Ekuivalen Transformator Satu Fasa [1]	7
Gambar 2.3	Kurva Magnetisasi/Histerisis [8]	7
Gambar 2.4	Rangkaian dasar feroresonansi	10
Gambar 2.5	Grafik hubungan fluks dan arus.....	11
Gambar 2.6	Osilasi pada rangkaian feroresonansi seri[1]	12
Gambar 2.7	<i>Fundamental mode</i> (a) Sinyal periodik (b) Spektrum sinyal	13
Gambar 2.8	<i>Subharmonic mode</i> (a) Sinyal periodik (b) Spektrum sinyal	13
Gambar 2.9	<i>Quasi-periodic mode</i> (a) Sinyal periodik (b) Spektrum sinyal	14
Gambar 2.10	<i>Chaotic mode</i> (a) Sinyal periodik (b) Spektrum sinyal	14
Gambar 3.1	Rangkaian ekuivalen modul pengujian feroresonansi....	16
Gambar 3.2	Skema modul pengujian feroresonansi	16
Gambar 3.3	Modul pengujian feroresonansi	17
Gambar 3.4	<i>Nameplate</i> Transformator M dan H.....	20
Gambar 3.5	Kapasitor.....	20
Gambar 3.6	MCB	20
Gambar 3.7	Sensor Tegangan Verivolt Entube DE-HB.....	21
Gambar 3.8	CT Clamp HIOKI 3238	21
Gambar 3.9	NI cDAQ9223	21
Gambar 3.10	Kurva magnetisasi transformator inti M	22
Gambar 3.11	Kurva magnetisasi transformator inti H	22
Gambar 3.12	Rangkaian Pengujian Tanpa Beban [1].....	24
Gambar 3.13	Kecenderungan nilai induktansi terhadap tegangan pada transformator H	24
Gambar 3.14	Kecenderungan nilai induktansi terhadap tegangan pada transformator M.....	24
Gambar 3.15	Penghitungan Kapasitansi Pada Kurva Magnetisasi Inti Transformator H Berdasarkan <i>Rudenberg's</i> <i>Graphical Method</i>	28

Gambar 3. 16	Penghitungan Kapasitansi Pada Kurva Magnetisasi Inti Transformator M Berdasarkan <i>Rudenberg's Graphical Method</i>	28
Gambar 3. 17	Pengujian Feroresonansi.....	30
Gambar 3. 18	Alur pengujian dan pengolahan data.....	31
Gambar 4. 1	Bentuk respon feroresonansi gelombang tegangan transformator H diseri kapasitor 30 μF pada tegangan sumber (a) 66 V, (b) 77 V, (c) 88 V, (d) 99 V.	35
Gambar 4. 2	Bentuk respon feroresonansi gelombang tegangan transformator M diseri kapasitor 30 μF pada tegangan sumber (a) 55 V, (b) 66 V, (c) 77 V, (d) 88 V.	36
Gambar 4. 3	Bentuk respon feroresonansi gelombang tegangan transformator H pada tegangan sumber 110 V hubung seri dengan kapasitor (a) tanpa kapasitor, (b) 10 μF , (c) 20 μF , (d) 30 μF , (e) 50 μF	38
Gambar 4. 4	Bentuk respon feroresonansi gelombang tegangan transformator M pada tegangan sumber 110 V hubung seri dengan kapasitor (a) tanpa kapasitor, (b) 20 μF , (c) 30 μF , (d) 50 μF , (e) 100 μF	40
Gambar 4. 5	Pengukuran Transformator H dengan kapasitor 10 μF	41
Gambar 4. 6	Pengukuran Transformator H dengan kapasitor 20 μF (Hubungan antara <i>Jump phenomenon</i> dengan Bentuk Gelombang Tegangan Tranformator).....	42
Gambar 4. 7	Pengukuran Transformator H dengan kapasitor 30 μF	43
Gambar 4. 8	Pengukuran Transformator H dengan kapasitor 50 μF	43
Gambar 4. 9	Pengukuran Transformator M dengan kapasitor 20 μF	43
Gambar 4. 10	Pengukuran Transformator M dengan kapasitor 30 μF	44
Gambar 4. 11	Pengukuran Transformator M dengan kapasitor 50 μF	44
Gambar 4. 12	Pengukuran Transformator M dengan kapasitor 100 μF	44

Gambar 4. 13	Bentuk respon feroresonansi gelombang tegangan transformator H dihubungkan dengan <i>Cseries</i> 20 uF dan <i>Cshunt</i> 10 uF di tegangan sumber (a) 121 V, (b) 132 V, (c) 143 V, (d) 154 V (e) 165 V.	47
Gambar 4. 14	Bentuk respon feroresonansi gelombang tegangan transformator M dihubungkan dengan <i>Cseries</i> 20 uF dan <i>Cshunt</i> 10 uF di tegangan sumber (a) 110 V, (b) 121 V, (c) 132 V, (d) 143 V, (e) 154 V, (f) 165 V.....	48
Gambar 4. 15	Bentuk respon feroresonansi gelombang tegangan transformator H dengan: a). Konfigurasi seri-paralel <i>Cseries</i> 20 uF dan <i>Cshunt</i> 10 uF di tegangan sumber 132 V (Hijau) b). Konfigurasi <i>Cthevenin</i> 30 uF di tegangan sumber 88 V (Biru).	50
Gambar 4. 16	Bentuk respon feroresonansi gelombang tegangan transformator M dengan: a). Konfigurasi seri-paralel <i>Cseries</i> 20 uF dan <i>Cshunt</i> 10 uF di tegangan sumber 132 V (Hijau) b). Konfigurasi <i>Cthevenin</i> 30 uF di tegangan sumber 88 V (Biru).	50
Gambar 4. 17	Bentuk respon feroresonansi gelombang tegangan transformator H dengan: a). Konfigurasi seri-paralel <i>Cseries</i> 20 uF dan <i>Cshunt</i> 10 uF di tegangan sumber 165 V (Hijau) b). Konfigurasi <i>Cthevenin</i> 30 uF di tegangan sumber 110 V (Biru).	51
Gambar 4. 18	Bentuk respon feroresonansi gelombang tegangan transformator M dengan: a). Konfigurasi seri-paralel <i>Cseries</i> 20 uF dan <i>Cshunt</i> 10 uF di tegangan sumber 165 V (Hijau) b). Konfigurasi <i>Cthevenin</i> 30 uF di tegangan sumber 110 V (Biru)	51
Gambar 4. 19	Bentuk respon feroresonansi gelombang tegangan transformator H dengan: a). Konfigurasi seri-paralel <i>Cseries</i> 30 uF dan <i>Cshunt</i> 20 uF di tegangan sumber 165 V (Hijau) b). Konfigurasi <i>Cthevenin</i> 50 uF di tegangan sumber 99 V (Biru).	52
Gambar 4. 20	Bentuk respon feroresonansi gelombang tegangan transformator M dengan: a). Konfigurasi seri-paralel	

	<i>Cseries</i> 30 uF dan <i>Cshunt</i> 20 uF di tegangan sumber 165 V (Hijau) b). Konfigurasi <i>Cthevenin</i> 50 uF di tegangan sumber 99 V (Biru).....	52
Gambar 4. 21	Bentuk respon feroresonansi gelombang tegangan transformator M dihubungkan dengan <i>Cseries</i> 70 uF dan <i>Cshunt</i> 30 uF di tegangan sumber (a) 88 V, (b) 99 V, (c) 110 V, (d) 154 V.	55
Gambar 4. 22	Bentuk respon feroresonansi gelombang tegangan transformator M dengan: a). Konfigurasi seri-paralel <i>Cseries</i> 70 uF dan <i>Cshunt</i> 30 uF di tegangan sumber 88 V (Hijau) b). Konfigurasi seri-paralel <i>Cseries</i> 50 uF dan <i>Cshunt</i> 50 uF di tegangan sumber 143 V (Biru).....	55

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1	Spesifikasi Transformator H dan M.....	18
Tabel 3. 2	Spesifikasi NI DAQ 9223.....	19
Tabel 3. 3	Kombinasi <i>Cseries</i> dan <i>Cshunt</i> Pengujian Transformtor H.....	27
Tabel 3. 4	Kombinasi <i>Cseries</i> dan <i>Cshunt</i> Pengujian Transformtor M.....	27
Tabel 4. 1	Spektrum harmonisa transformator H kondisi normal (tanpa kapasitor = 0 uF)	58
Tabel 4. 2	Spektrum harmonisa transformator M kondisi normal (tanpa kapasitor = 0 uF)	588
Tabel 4. 3	Spektrum harmonisa transformator H dengan kapasitor 10 uF konfigurasi seri.....	59
Tabel 4. 4	Spektrum harmonisa transformator H dengan kapasitor 20 uF konfigurasi seri.....	599
Tabel 4. 5	Spektrum harmonisa transformator H dengan kapasitor 30 uF konfigurasi seri.....	60
Tabel 4. 6	Spektrum harmonisa transformator H dengan kapasitor 50 uF konfigurasi seri.....	60
Tabel 4. 7	Spektrum harmonisa transformator M dengan kapasitor 20 uF konfigurasi seri.....	61
Tabel 4. 8	Spektrum harmonisa transformator M dengan kapasitor 30 uF konfigurasi seri.....	611
Tabel 4. 9	Spektrum harmonisa transformator M dengan kapasitor 50 uF konfigurasi seri.....	62
Tabel 4. 10	Spektrum harmonisa transformator M dengan kapasitor 100 uF konfigurasi seri.....	62
Tabel 4. 11	Spektrum harmonisa transformator H dengan kapasitor <i>Cseries</i> 20 uF dan <i>Cshunt</i> 10 uF (konfigurasi seri- paralel)	63
Tabel 4. 12	Spektrum harmonisa transformator H dengan kapasitor <i>Cseries</i> 30 uF dan <i>Cshunt</i> 20 uF (konfigurasi seri- paralel)	63

Tabel 4. 13 Spektrum harmonisa transformator M dengan kapasitor
Cseries 20 uF dan *Cshunt* 10 uF (konfigurasi seri-
paralel).....64

Tabel 4. 14 Spektrum harmonisa transformator M dengan kapasitor
Cseries 30 uF dan *Cshunt* 20 uF (konfigurasi seri-
paralel).....64

Tabel 4. 15 Spektrum harmonisa transformator M dengan kapasitor
Cseries 50 uF dan *Cshunt* 50 uF (konfigurasi seri-
paralel).....65

Tabel 4. 16 Spektrum harmonisa transformator M dengan kapasitor
Cseries 70 uF dan *Cshunt* 30 uF (konfigurasi seri-
paralel).....66

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem tenaga listrik terdiri dari banyak elemen penting dan kompleks yang saling bekerjasama untuk menyalurkan energi listrik ke konsumen secara ekonomis dan ramah lingkungan [1]. Pada kenyataannya, sistem tenaga listrik tidak bebas dari gangguan yang dapat menghambat penyaluran energi listrik. Seperti pada sistem transmisi tegangan tinggi, kabel overhead lines beresiko mengalami kerusakan akibat terkena sambaran petir. Fenomena sambaran petir tersebut dinamakan kejadian peralihan sistem secara tiba-tiba atau transien. Transien dapat berakibat fatal dan merugikan bagi sistem tenaga listrik jika tidak diimbangi oleh sistem proteksi yang memadai. Akibatnya, keandalan sistem tenaga listrik dalam kontinuitas aliran daya dan sistem bisa saja menurun. Oleh karena itu, sistem tenaga listrik diperlukan untuk terus berkembang dengan teknologi yang canggih guna mencapai energi listrik yang berkelanjutan. Peralatan-peralatan listrik perlu berfungsi secara optimal dalam memaksimalkan penyaluran energi listrik. Salah satu peralatan yang harus bekerja dengan baik adalah transformator.

Transformator adalah peralatan listrik yang sangat umum digunakan pada sistem tenaga. Transformator menginduksikan tegangan pada belitan sekunder saat belitan primer diberi tegangan oleh sumber. Adanya perpindahan aliran fluks pada inti yang bersifat induktansi non-linear, akan menyebabkan transformator dapat menaikkan atau menurunkan tegangan sesuai jumlah belitannya yang dililitkan pada inti. Pada pengaplikasiannya, transformator dibagi menjadi dua jenis yaitu transformator daya dan transformator pengukuran. Transformator pengukuran dibagi menjadi pengukur arus dan pengukur tegangan. Transformator tegangan banyak ditemukan di gardu induk sistem transmisi karena merupakan transformator satu fasa step down untuk melengkapi peran pembacaan indikator alat. Biaya yang ekonomis dan keamanan operator juga mendukung alasan digunakannya transformator tegangan. Transformator tegangan yang sering digunakan pada tegangan tinggi adalah *capasitive voltage transformer* (CVT). Pada CVT terdapat pembagi tegangan kapasitif yang dihubung seri dengan trafo penengah (*intermediate transformer*) dengan inti bersifat induktansi non-linier.

Rangkaian ini membentuk suatu rangkaian tertutup yang berpeluang menimbulkan gejala feroresonansi jika dipicu oleh transien [2].

Interaksi antara induktor non-linear dan kapasitor akan membangkitkan resonansi diantara keduanya. Resonansi yang dipicu transien ini biasa disebut feroresonansi. Feroresonansi ditandai dengan bentuk tegangan yang abnormal dengan tingkat harmonisa yang melebihi batas tertentu [3]. Tingkat tegangan lebih atau arus lebih yang terjadi dapat berbahaya bagi peralatan listrik. Contoh kerusakan yang dialami adalah pemanasan yang berlebihan pada tranformator sehingga dapat menyebabkan transformator mengalami penuaan dini lalu terbakar. Selain berbahaya bagi peralatan, arus dan tegangan yang timbul akibat feroresonansi menjadi sangat berbahaya bagi operator. Efek lain ketika feroresonansi terjadi adalah kegagalan peralatan proteksi pada sietem. Hal tersebut akan mempengaruhi keandalan dari sistem tenaga listrik.. Pada dasarnya fenomena ini sangat sulit diprediksi penyebabnya dan karakterisasinya dengan gangguan-gangguan lain sehingga peluang terjadi feroresonansi pada sistem sangat kecil. Namun karena dampak buruk yang dihasilkan sangat besar, permasalahan feroresonansi harus segera diatasi atau ditangani. Sehingga, banyak studi pengujian feroresonansi di laboratorium untuk memodelkan kondisi nyata yang dapat terjadi di sistem tenaga listrik.

Studi-studi pengujian terkait inisiasi feroresonansi mampu menjelaskan fenomena ini secara fisik. Pengujian skala laboratorium dapat dijadikan pendekatan alternatif dari sistem yang sebenarnya dan memiliki keunggulan seperti resiko keamanan yang rendah (pengujian terkontrol), dan perekaman data respon feroresonansi yang baik.

Permasalahan yang akan dibahas dalam studi ini adalah bagaimana memunculkan feroresonansi melalui rangkaian modul pengujian ferorsonansi yang dihubungkan dengan trafo satu fasa tegangan rendah. Masalah dalam studi ini dibatasi pada analisis pengaruh jenis inti trafo, nilai-nilai kapasitansi, variasi tegangan input, konfigurasi trafo-kapasitor terhubung seri/paralel terhadap kemungkinan terjadinya feroresonansi.

Tujuan yang ingin dicapai dalam studi ini adalah mendapatkan range nilai kapasitansi, tegangan input pada jenis inti trafo yang berbeda dengan cara menghubungkannya secara seri/paralel untuk mendapatkan respon feroresonansi. Respon feroresonansi tersebut ditinjau dari bentuk fisik tegangan transformator, adanya *jump phenomenon*, dan spektrum harmonisa untuk mengklasifikasikan mode-mode feroresonansi.

Metode yang digunakan dalam studi ini, yang pertama adalah melakukan studi literatur terkait transformator dan karakteristik feroresonansi untuk menimbulkan fenomena feroresonansi. Kedua mendesain rangkaian modul pengujian feroresonansi. Ketiga melakukan pengujian kurva magnetisasi inti pada transformator 110 V dengan inti berbeda, yaitu M dan H. Setelah mendapat kurva magnetisasi masing-masing trafo, dapat dilanjutkan dengan mendapatkan besar orde nilai kapasitor yang dapat menimbulkan feroresonansi. Besar orde kapasitor dicari melalui kurva magnetisasi inti dengan metode pendekatan *Rudenburg's graphical*. Selanjutnya, melakukan pengujian feroresonansi pada kedua trafo dengan variasi tegangan input, variasi kapasitor, dan variasi konfigurasi trafo-kapasitor terhubung seri atau seri-paralel. Hasil percobaan akan dianalisa untuk mendapat hasil analisa yang nantinya akan digunakan sebagai rujukan menarik kesimpulan.

1.2 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

Bab 1 : Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika pembahasan, dan relevansi.

Bab 2 : Bab ini membahas mengenai dasar teori yang digunakan untuk menunjang penyusunan tugas akhir ini, yaitu transformator dan feroresonansi.

Bab 3 : Bab ini membahas mengenai metodologi yang digunakan dalam pengerjaan studi ini. Antara lain, perancangan alat, metode pengambilan data, metode pengolahan data.

Bab 4 : Bab ini membahas hasil percobaan yang telah dilakukan dan analisa hasil percobaan sehingga dapat diketahui parameter-parameter yang tepat dari rangkaian dasar feroresonansi dalam menimbulkan fenomena feroresonansi pada transformator satu fasa tegangan rendah.

Bab 5 : Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil pembahasan yang telah dilakukan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Kajian Penelitian Terkait

Penelitian [6] menggunakan rangkaian feroresonansi dasar dalam menginisiasi respon feroresonansi. Pengujian dilakukan pada transformator satu fasa ($30 V_{rated}$) dan tiga fasa kaki tidak simetris ($127 V_{rated}$). Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Rudenburg's graphical* dalam mencari kisaran nilai kapasitansi yang dapat memunculkan respon feroresonansi. Variasi tegangan sumber, variasi pelepasan fasa dan variasi nilai kapasitansi dilakukan pada pengujian. Hasil penelitian menunjukkan bahwa: a) satu mode feroresonansi (fundamental) hanya diperoleh sebagai respon gelombang tegangan di kedua transformator, b) pada pengujian transformator satu fasa, mode fundamental diperoleh ketika semakin besarnya tegangan sumber dan nilai kapasitansi, c) pada pengujian transformator tiga fasa, variasi kapasitansi memberikan kondisi tegangan lebih sebesar 10 % dan variasi pelepasan fasa menyebabkan kondisi tegangan kurang.

2.2 Teori Dasar

2.2.1 Transformator

Transformator adalah salah satu peralatan listrik yang mengubah tegangan ke level tegangan tertentu melalui perubahan aliran fluks terhadap waktu di inti transformator. Transformator terdiri dari dua elemen penting yaitu belitan dan inti yang terbuat dari bahan feromagnetik. Idealnya, perbandingan belitan sisi primer dan sekunder sebanding dengan tegangan primer dan sekunder transformator. Namun, terdapat fluks bocor yang dihasilkan oleh kumparan primer dan kumparan sekunder ini menyebabkan adanya mutual flux. Fluks tersebut tidak mengalir di udara, melainkan mengalir pada inti transformator [4]. Gambar 2.1 menggambarkan konstruksi dalam transformator.

2.2.1.1 Prinsip Induksi Elektromagnetik

Saat diberi sumber tegangan bolak-balik, di inti trafo akan terjadi perubahan fluks terhadap waktu. Perbedaan belitan dikedua sisi trafo akan menyebabkan *mutual induction* yang tinggi. Dengan *mutual induction* dan perubahan fluks terhadap waktu akan menghasilkan suatu proses atau prinsip kerja untuk menimbulkan gaya gerak listrik induksi. Prinsip kerja ini disebut dengan Hukum Faraday [1]. Hukum Faraday

menyatakan bahwa gaya gerak listrik terinduksi pada rangkaian tertutup sama dengan negatif rate perubahan fluks magnetik terhadap waktu di dalam rangkaian. Berdasarkan hukum Faraday yang menyatakan magnitudo dari *electromotive force* (emf) proporsional terhadap perubahan fluks terhubung dan hukum Lenz yang menyatakan arah dari emf berlawanan dengan arah fluks sebagai reaksi perlawanan dari perubahan fluks tersebut didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

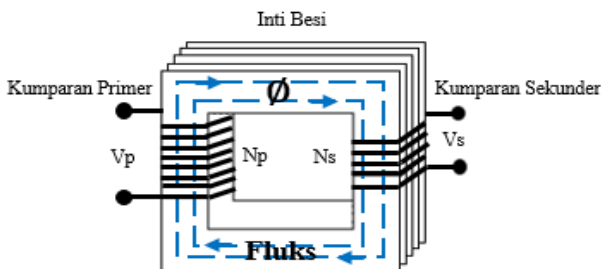
Dimana:

e = GGL induksi (Volt)

N = Jumlah lilitan

$d\phi$ = Perubahan garis-garis gaya magnet (Watt)

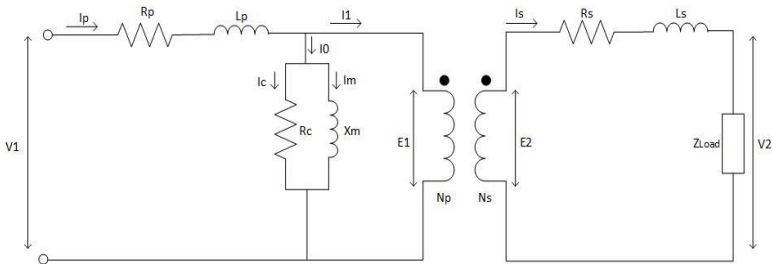
dt = Perubahan waktu (s)



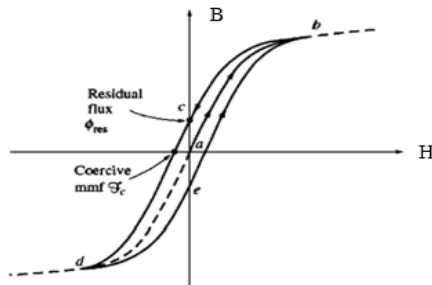
Gambar 2.1 Konstruksi transformator [7]

2.1.1.2 Rangkaian Ekuivalen Transformator Satu Fasa

Rangkaian ekuivalen pada transformator sangat penting untuk menganalisis kerja suatu transformator dengan kondisi seperti keadaan yang nyata. Rangkaian ekuivalen memerhatikan rugi-rugi belitan dan komponen magnetisasi inti, seperti resistansi inti dan reaktansi magnetisasi. Gambar 2.5 menunjukkan rangkaian ekuivalen transformator tidak ideal karena terlihat parameter dari resistansi inti dan reaktansi magnetisasi. Fluks bocor ϕ_p belitan primer yang ditunjukkan sebagai reaktansi X_p dan fluks bocor ϕ_s belitan sekunder yang ditunjukkan



Gambar 2. 2 Rangkaian Ekivalen Transformator Satu Fasa [1]



Gambar 2. 3 Kurva Magnetisasi/Histerisis [8]

sebagai reaktansi X_S . Rugi tahanan untuk belitan primer ditunjukkan dengan R_P dan rugi tahanan untuk belitan sekunder ditunjukkan dengan R_S . Rugi-rugi *Hysteresis* dan *Eddy current* terdapat pada komponen magnetisasi inti. Rugi *Hysteresis* adalah kerugian akibat fluks bolak-balik di inti besi. Rugi *Eddy current* adalah kerugian akibat arus pusar pada inti transformator. Nilai kerugian ini sebanding dengan nilai kuadrat tegangan yang digunakan pada transformator [1].

2.1.1.3 Kurva magnetisasi pada Inti Transformator

Ketidaklinearan pada inti transformator ditunjukkan dengan fenomena histerisis (kurva magnetisasi) pada trafo, seperti pada Gambar 2.3. Kurva magnetisasi merepresentasikan inti dari sebuah transformator. Kurva magnetisasi menggambarkan karakteristik transformator yang menunjukkan hubungan antara kerapatan magnetik (B) dan intensitas medan magnetik (H). Pada Gambar 2.3 jalur a-b merupakan kondisi awal dari trafo saat diberikan tegangan sumber. Kerapatan fluks terus

meningkat hingga mencapai titik saturasi (horizontal). Penurunan nilai arus mengakibatkan penurunan fluks, yang kembali dengan jalur berbeda dari jalur awal, yaitu jalur $b-c-d$. Hal ini disebabkan oleh adanya fluks sisa. Untuk memaksa fluks mencapai nilai nol maka sejumlah *magnetomotive force (mmf)* dibutuhkan dan dikenal dengan istilah *coercive mmf*. Saat arus naik, fluks juga naik tetapi melalui jalur $d-e-b$, akibat fluks sisa tersebut. Hal ini ditandai dengan intensitas medan (H) sudah mencapai titik nol, kerapatan fluks (B) tidak mencapai titik. Fluks sisa tersebut dipengaruhi oleh permeabilitas inti trafo. Sedangkan permeabilitas trafo dipengaruhi dari pemilihan bahan material inti trafo.

Semakin baik jenis material inti trafo yang digunakan maka kurva magnetisasi akan semakin lurus atau semakin cenderung linear. Dan begitu juga sebaliknya apabila material inti trafo yang digunakan kurang baik maka kurva magnetisasi cenderung semakin lebar [8].

2.1.2 Feroresonansi

Fenomena feroresonansi adalah suatu fenomena yang biasanya terjadi pada transformator yang diseri dengan kapasitor. Rangkaian ini akan menimbulkan tegangan lebih beresilasi pada keadaan steady state [10, 12]. Dampak seperti feroresonansi dapat menyebabkan trafo yang terseri kapasitor, tidak lagi bekerja normal pada daerah linearnya, namun bekerja pada daerah non-linear (saturasi). Aktivitas trafo seperti ini dapat menyebabkan trafo menjadi panas (*overheating*) dan mengarah ke penuaan dini dan kegagalan operasi jika dibiarkan berkelanjutan.

2.1.2.1 Resonansi vs Feroresonansi

Rangkaian listrik mempunyai unsur resistif (R), kapasitif (C), dan induktif (L) didalamnya. Suatu gejala kelistrikan yang timbul diakibatkan oleh unsur-unsur tersebut biasa disebut dengan resonansi. Resonansi merupakan sebuah fenomena yang dapat bersifat mengganggu bagi peralatan listrik yang tersambung pada suatu rangkaian listrik. Resonansi mengakibatkan nilai arus yang maksimum. Hal tersebut terjadi karena nilai impedansi bernilai minimum atau mendekati nol. Nilai impedansi yang minimum disebabkan oleh kompensasi antara induktor dan kapasitor ($X_L = X_C$) menghasilkan $jX = 0$ sehingga $Z = R$. Feroresonansi memiliki parameter sistem yang sama dengan resonansi, namun induktornya bersifat non-linear. Ketidaklinearan induktansi berasal dari material feromagnetik.

2.1.2.2 *Penyebab Munculnya Feroresonansi*

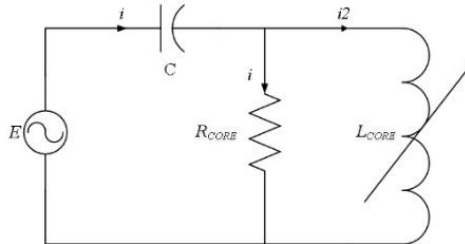
Dalam rangkaian dasar feroresonansi (Gambar 2.4), feroresonansi muncul ketika nilai R dan C konstan, tetapi nilai L merupakan nilai yang berubah-ubah sepanjang waktu mengikuti kurva magnetisasi. Pada pengoperasian biasa, misalkan pada peralatan seperti transformator, nilai induktansi L bekerja pada daerah linier. Nilai L tidak sampai ujung dari kurva magnetisasi sehingga nilai L pada saat itu masih konstan. Pada saat kondisi transien seperti tersambar petir, terdapat proses switching, atau bahkan terjadi gangguan hubung singkat, hal itu dapat memicu rangkaian sehingga bergerak pada mode ujung-ujung kurva magnetisasi. Pada saat itu, nilai L akan berubah-ubah. Ketika nilai L berpadanan dengan nilai C , dengan frekuensi yang bukan 50 Hz, terbentuklah suatu respon dengan nama feroresonansi [9].

Timbulnya feroresonansi pada sebuah sistem tenaga listrik harus memenuhi tiga hal penting yakni induktansi nonlinear, elemen kapasitif dan sumber AC. Elemen yang digunakan untuk menimbulkan ketidaklinieran induktansi adalah bahan feromagnetik yang digunakan sebagai material inti trafo. Sehingga untuk fenomena feroresonansi trafo mendapatkan perhatian khusus. Hal tersebut dikarenakan induktansi nonlinear dihasilkan dari inti trafo yang dapat menyebabkan feroresonansi dapat terjadi.

2.1.2.3 *Pendekatan Fisik Feroresonansi*

Berikut adalah perbedaan utama antara rangkaian feroresonansi dengan resonansi [3]:

- a. Feroresonansi dapat terjadi pada berbagai kisaran nilai kapasitansi.
- b. Frekuensi gelombang tegangan dan arus transformator hasil feroresonansi dapat berbeda dari frekuensi tegangan sumber.
- c. Dengan konfigurasi dan nilai parameter rangkaian yang sama, respon steady state yang dihasilkan dapat muncul berupa respon yang normal atau abnormal. Fluks sisa transformator, muatan kapasitor, dan pengoperasian pemutus daya menentukan respon steady state yang akan muncul.



Gambar 2. 4 Rangkaian dasar feroresonansi

Berdasarkan perbedaan utama tersebut, dapat dikembangkan menjadi karakteristik dasar feroresonansi. Gambar 2.6 menunjukkan osilasi steady state gelombang feroresonansi. Peristiwa osilasi pada rangkaian feroresonansi seri dijelaskan berdasarkan urutan waktu seperti berikut :

- a. Sesaat t_0 , saklar K ditutup maka arus I terbentuk, dan berosilasi pada bentuk getaran dengan persamaan:

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.2)$$

- b. Hubungan fluks pada kumparan dengan tegangan V pada kapasitor dapat dituliskan dengan rumus:

$$\theta = \left(\frac{V_0}{\omega_1} \right) \sin \omega_1 t; v = V_0 \cos \omega_1 t \quad (2.3)$$

- c. Jika $V_0/\omega > \theta_{sat}$ pada akhir t_1 , fluks akan mencapai saturasi menjadi θ_{sat} dan tegangan V sama dengan V_1 . L_s merupakan nilai induktansi kumparan yang telah mengalami saturasi. Dikarenakan L_s memiliki nilai yang sangat kecil dibandingkan L , maka kapasitor akan discharge secara mendadak melewati kumparan dalam bentuk persamaan osilasi:

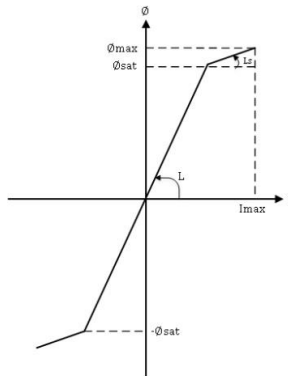
$$\omega_2 = 1/\sqrt{L_s C} \quad (2.4)$$

- d. Arus dan fluks mencapai puncak ketika energi elektromagnetik tersimpan pada kumparan, ekuivalen dengan energi yang tersimpan pada kapasitor $\frac{1}{2} CV^2$

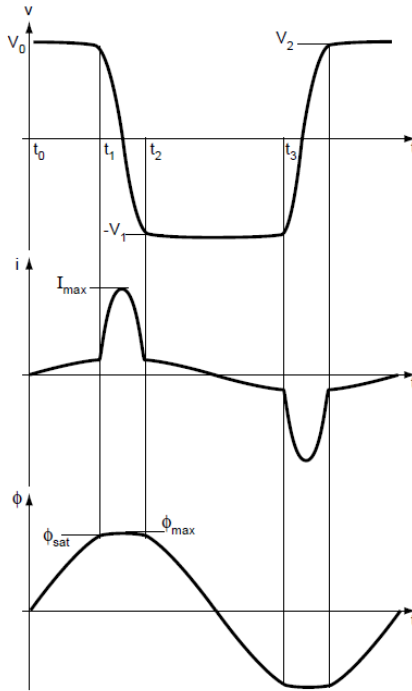
- e. Pada saat t_2 , fluks kembali menjadi θ_{sat} . Induktansi diasumsikan dengan nilai L , tegangan dengan nilai v dan terbalik sehingga bernilai $-V_2$.
- f. Pada saat t_3 , fluks mencapai $-\theta_{sat}$ dan tegangan bernilai $-V_2$. Pada kondisi sebenarnya nilai ω_1 sangat kecil sehingga dapat diasumsikan bahwa $V_1 \approx V_2 \approx V_0$.
- g. Periode T dari osilasi berpengaruh terhadap nilai $2\pi\sqrt{LC}$ pada kondisi tidak saturasi, sedangkan pada kondisi saturasi nilainya menjadi $2\pi\sqrt{L_s C} + 2(t_3 - t_2)$ dimana $t_3 - t_2 \approx 2\theta_{sat}/V_0$. Persamaan frekuensi untuk kedua kondisi tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} < f < \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C}} \quad (2.5)$$

Frekuensi inisial tersebut bergantung pada θ_{sat} dalam kondisi tidak linier dan tegangan inisial V_0 . Pada kenyataannya kondisi tersebut sangat sulit diperoleh karena adanya rugi-rugi I^2R pada resistor R sehingga tegangan V akan menurun ($V_2 < V_1 < V_0$). Hal tersebut dikarenakan terdapat perbedaan fluks selama periode non-saturasi ($t_3 - t_2$) dan menimbulkan penurunan tegangan. Penurunan tegangan berakibat pada penurunan frekuensi.



Gambar 2. 5 Grafik hubungan fluks dan arus



Gambar 2. 6 Osilasi pada rangkaian feroresonansi seri[1]

2.1.2.4 Klasifikasi Feroresonansi[1]

Beberapa respon *steady-state* dari feroresonansi muncul akibat elemen non-linear di rangkaian feroresonansi secara acak. Secara mendasar ada empat tipe respon *steady-state* dari suatu rangkaian feroresonansi. Keempat klasifikasi tersebut adalah sebagai berikut.

a. *Fundamental Mode*

Fundamental mode memiliki respon periodeik tegangan dan arus yang sama dengan sistem. Spektrum sinyal terdiri atas frekuensi fundamental sistem sebagai respon yang dominan dan diikuti oleh harmonisa ke- 3, 5, 7, dan n harmonisa ganjil.

b. *Subharmonic Mode*

Sinyal feroresonansi tipe ini memiliki periode kelipatan nT dari periode sumbernya. *Fundamental mode* dari suatu feroresonansi biasanya dituliskan dengan feroresonansi periode-1 ($f_0/1$ Hz) dan

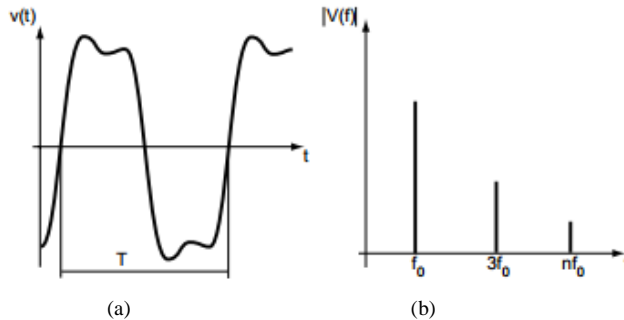
feroresonansi dengan periode sub-kelipatan dari frekuensi sistem disebut feroresonansi periode- n (f_0/n Hz). f_0 menandakan frekuensi fundamental dan n adalah sebuah integer.

c. *Quasi-periodic Mode*

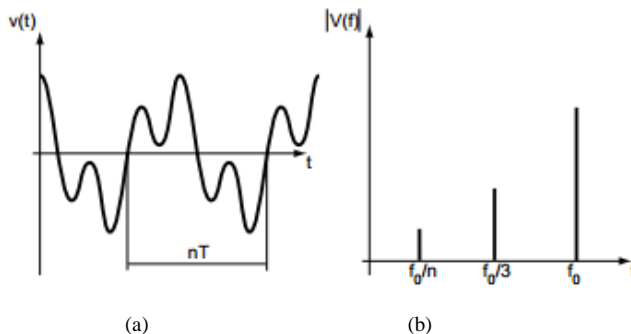
Sinyal feroresonansi jenis ini tidak periodik. Spektrum sinyalnya merupakan diskontinyu, didefinisikan sebagai $nf_1 + mf_2$ (n dan m adalah integer dan f_1/f_2 merupakan nilai riil irrasional)

d. *Chaotic Mode*

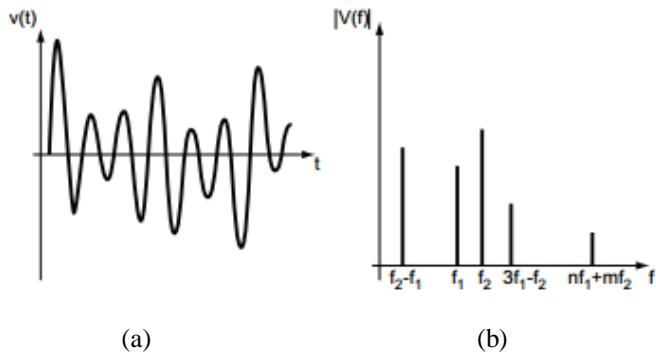
Feroresonansi jenis ini memiliki spektrum sinyal non-periodik dan kontinyu. Sinyal ini tidak dapat diinterupsi oleh frekuensi apapun dan berbentuk tidak teratur (*chaos*).



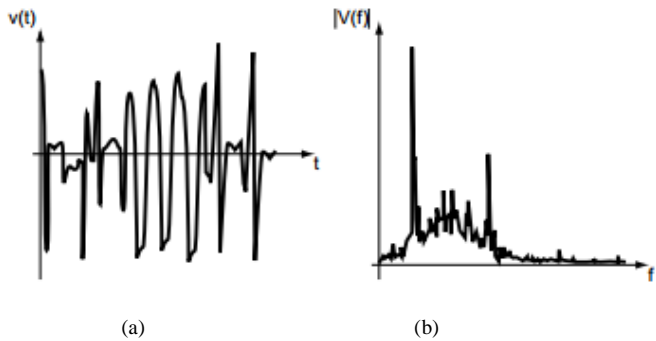
Gambar 2. 7 *Fundamental mode* (a) Sinyal periodik (b) Spektrum sinyal



Gambar 2. 8 *Subharmonic mode* (a) Sinyal periodik (b) Spektrum sinyal



Gambar 2. 9 *Quasi-periodic mode* (a) Sinyal periodik (b) Spektrum sinyal



Gambar 2. 10 *Chaotic mode* (a) Sinyal periodik (b) Spektrum sinyal

BAB 3

PERANCANGAN ALAT EKSPERIMEN, PENGUJIAN DAN PENGOLAHAN DATA

Dalam studi ini, pengujian dilakukan pada Laboratorium Tegangan Tinggi Teknik Elektro ITS. Modul pengujian feroresonansi dapat dipahami melalui pemodelan rangkaian ekivalen yang terjadi di lapangan seperti Gambar 3.1. Gambar 3.1 merupakan salah satu konfigurasi yang digunakan untuk mendapatkan kemungkinan feroresonansi dengan mode-mode berbeda [5]. Modul pengujian feroresonansi akan dihubungkan dengan variasi tegangan sumber berupa trafo regulator (220 V) dan PC. Modul pengujian ini akan diimplementasikan pada dua transformator satu fasa tegangan rendah jenis inti H dan M.

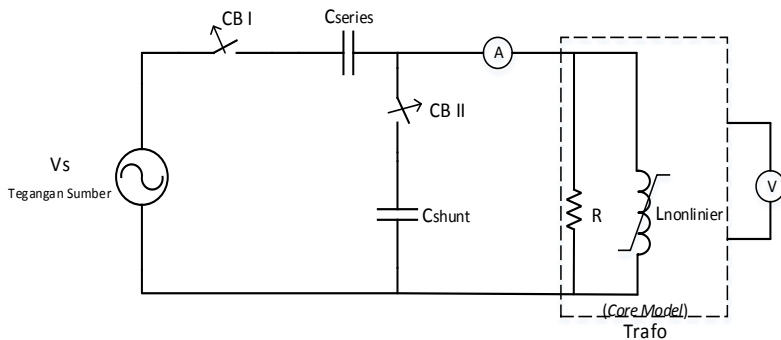
Skema dari modul pengujian feroresonansi ditunjukkan Gambar 3.2. Gambar 3.3 menunjukkan realisasi modul pengujian feroresonansi. Modul terdiri dari MCB, kapasitor, transformator, alat pengukuran, dan alat akusisi data. Alat pengukuran terdiri dari multimeter, CT *clamp*, dan sensor tegangan verivolt. CT *clamp* mengampit kabel yang menghubungkan kapasitor dan trafo untuk mengukur arus trafo. Input verivolt dipasang secara paralel pada sisi primer trafo. Verivolt berguna untuk mendeteksi tegangan agar dapat direkam oleh alat akusisi data (NI cDAQ 9223). Gambar 3.2 dapat dipecah menjadi dua kondisi tersebut dapat dipisahkan sesuai dengan konfigurasi rangkaian yang diinginkan. MCB pertama dihubungkan sebelum kapasitor seri dan MCB kedua dihubungkan sebelum kapasitor paralel. Dengan begitu, modul pengujian ini dapat dengan mudah untuk digunakan tanpa harus menghubungkan ulang kabel konduktor.

Dua kapasitor *Cseries* dan *Cshunt* dapat disebut *grading capacitance* dan *shunt capacitance*. *Shunt capacitance* memiliki hubungan paralel dengan induktansi nonlinier. Sedangkan *grading capacitance* ini memiliki hubungan seri dengan induktansi nonlinier. Realita yang terjadi pada sistem tenaga, *Cseries* timbul akibat adanya pembukaan pemutus daya dan *Cshunt* timbul dari line charging saluran transmisi.

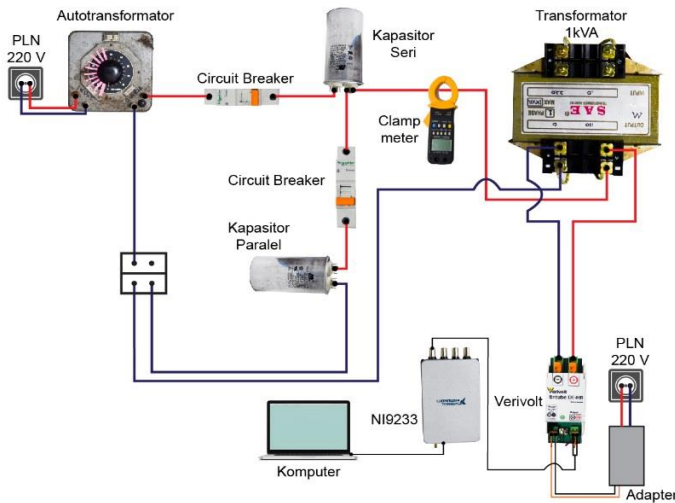
Pada penelitian [6], digunakan rangkaian thevenin untuk mendapatkan respon feroresonansi. Rangkaian thevenin mengacu pada rangkaian dasar feroresonansi agar didapatkan pendekatan feroresonansi

secara sederhana. Rangkaian thevenin ini dikenal dengan rangkaian feroresonansi dasar karena hanya terdiri dari kapasitor thevenin dan induktor non-linear terhubung seri. Dimana nilai kapasitor thevenin adalah hasil penjumlahan C_{series} dan C_{shunt} . Sehingga didapatkan persamaan 3.1 pembagi tegangan untuk mendapatkan relasi antara rangkaian dasar feroresonansi dengan rangkaian feroresonansi yang kompleks.

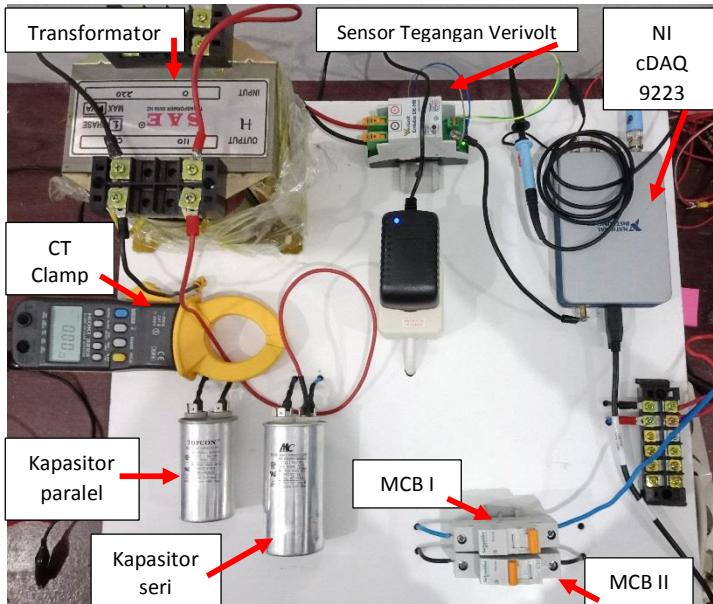
$$V_{th} = \frac{C_{series}}{C_{thevenin}} V_{in} \tag{3.1}$$



Gambar 3. 1 Rangkaian ekivalen modul pengujian feroresonansi



Gambar 3. 2 Skema modul pengujian feroresonansi



Gambar 3. 3 Modul pengujian feroresonansi

3.1 Perancangan *Hardware* Modul Pengujian

3.1.1 Transformator Satu Fasa

Transformator yang diujikan adalah transformator satu fasa tegangan rendah seperti yang ditunjukkan Gambar 3.4. Spesifikasi kedua trafo ditunjukkan pada Tabel 3.1. Dalam sisi material, kemurnian suatu inti transformator mempengaruhi kurva magnetisasinya. Kekuatan permeabilitas inti M lebih baik dari inti H. Hal ini dikarenakan material inti M mempunyai kandungan feromagnetik lebih murni daripada inti H. Sehingga, manufaktur di pasaran mengkatagorikan inti H lebih baik digunakan untuk trafo berdaya rendah dan inti M untuk berdaya lebih dari 10 kVA. Hal tersebut didasari oleh pertimbangan kemurnian suatu material feromagnetik yang berbanding lurus dengan tingginya biaya produksi.

Tabel 3. 1 Spesifikasi Transformator H dan M

Fasa	1 Fasa
Rasio	1000 VA
V1 : V2	110 : 220
Frekuensi	50 Hz

3.1.2 Kapasitor

Gambar 3.5 menunjukkan kapasitor yang digunakan pada pengujian ini. Kapasitor tersebut adalah kapasitor bank AC yang mudah ditemukan di pasaran. Semua kapasitor memiliki besar tegangan kerja yang sama yaitu 450 VAC di frekuensi kerja 50/60 Hz. Kapasitor tersebut mempunyai nilai kapasitansi yang berbeda-beda. Pemilihan range nilai kapasitor untuk pengujian feroresonansi akan dibahas pada sub bab berikutnya.

3.1.3 MCB

MCB adalah peralatan pengaman arus lebih yang sangat umum digunakan untuk sistem kelistrikan tegangan rendah. MCB umumnya digunakan karena memiliki keunggulan lebih daripada *fuse*. Pemakaian MCB yang dapat digunakan berulang-ulang, tidak seperti *fuse* yang harus diganti setiap kali ada gangguan pada sistem kelistrikan, sehingga rangkaian tidak dapat langsung cepat dialiri listrik kembali ketika gangguan telah diatasi.

Gambar 3.6 menunjukkan MCB yang digunakan pada pengujian ini. MCB digunakan sebagai saklar *energize* transformator dan juga pengaman rangkaian eksperimen keseluruhan dari arus lebih. Spesifikasi arus MCB yang digunakan dalam eksperimen ini adalah 10 A. Didalam trafo regulator (berlaku sebagai tegangan sumber) itu sendiri sudah terpasang *fuse* 10 A untuk *memback-up* MCB. Hal ini bertujuan melindungi peralatan dari kerusakan.

3.1.4 Sensor Tegangan Verivolt

Gambar 3.7 menunjukkan sensor tegangan Verivolt Entube DE-HB. Sensor berguna untuk mengukur tegangan sehingga dipasang secara paralel terhadap transformator. Sensor ini membutuhkan daya berupa tegangan DC dengan range 9 V hingga 28 V sehingga dibutuhkan adaptor untuk menyalakannya. Perbandingan tegangan keluarannya adalah 2000 V : 10 V. Sensor ini memiliki panjang bandwith 20 MHz dengan akurasi pembacaan data $\pm 0.2\%$. Tegangan transformator yang

diukur oleh sensor Verivolt, akan dibaca gelombang tegangannya dengan alat perekam tegangan NI cDAQ 9223.

3.1.5 CT Clamp HIOKI 3283

Gambar 3.8 adalah CT Clamp HIOKI 3283 untuk mengukur arus RMS dari transformator. Besar arus yang terbaca pada CT Clamp ini mempunyai range 1.0 mA sampai 200 A RMS. Akurasi pembacaan data $\pm 1.0\%$. *Current Transformer* (CT) Clamp ini dapat membaca besar arus dengan prinsip medan elektromagnetik belitan toroida yang mengelilingi kabel.

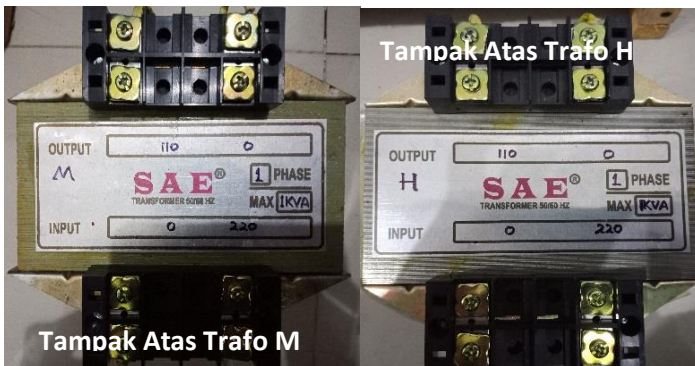
3.1.6 Alat Perekam Tegangan NI DAQ

NI DAQ 9223 (Gambar 4.9) adalah sebuah alat akuisisi data yang dibuat oleh National Instruments yang dikhususkan untuk melakukan sampling sinyal tegangan. Alat ini mengkonversikan sinyal analog menjadi sinyal digital sehingga dapat dibaca oleh aplikasi LabVIEW di komputer. Alat ini memiliki 4 channel masukan sinyal tegangan, dan memiliki rating tegangan masukan sebesar $10 V_{\text{rms}}$ untuk masing-masing channel.

Perekaman respon feroresonansi pada aplikasi LabVIEW menggunakan data sampling dari alat sensor tegangan Verivolt Entube DE-HB yang diintegrasikan dengan NI DAQ 9223 ini. Data sinyal tegangan hasil sampling dikirim ke PC melalui media kabel USB. Berikut adalah spesifikasi dari alat NI DAQ 9223:

Tabel 3. 2 Spesifikasi NI DAQ 9223

NI DAQ 9246	
Jumlah Input	4 Channel
Laju Sampling Maksimum	1MS/s (tiap channel)
Input Voltage ranges	$\pm 10V_{\text{rms}}$ kontinyu
Resolusi	16-bit
Suhu Operasi	-40°C hingga 70°C



Gambar 3. 4 Nameplate Transformator M dan H



Gambar 3. 5 Kapasitor



Gambar 3. 6 MCB



Tampak Atas Verivolt



Tampak Samping Verivolt

Gambar 3. 7 Sensor Tegangan Verivolt Entube DE-HB

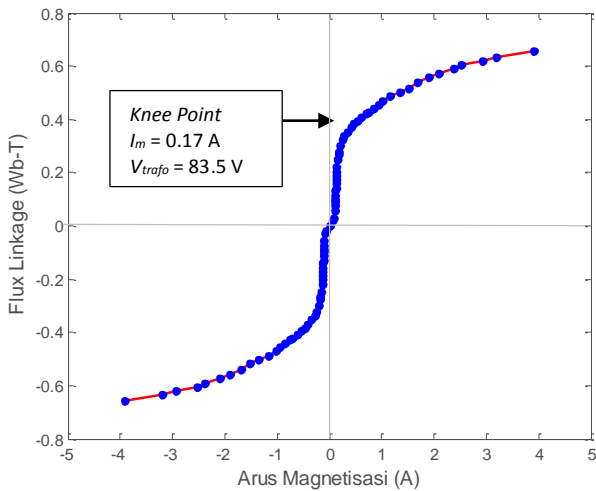


Gambar 3. 8 CT Clamp HIOKI 3238

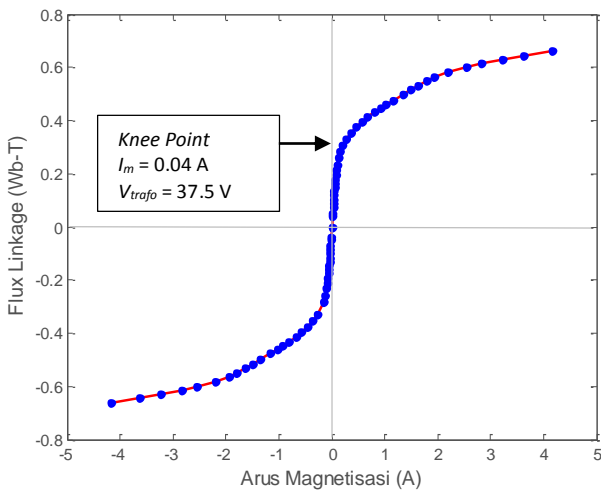


Gambar 3. 9 NI cDAQ9223

3.2 *No-Load Test Transformer (Pengujian Kurva Magnetisasi)*



Gambar 3. 10 Kurva magnetisasi transformator inti M



Gambar 3. 11 Kurva magnetisasi transformator inti H

Feroresonansi mempunyai makna peristiwa yang terjadi antara komponen internal (inti transformator) dan komponen eksternal (kapasitor). Komponen internal yang diteliti pada pengujian ini adalah kurva magnetisasi inti dari kedua transformator. Kurva magnetisasi didapatkan dari pengujian transformator kondisi tanpa beban (*open loop*), sehingga rugi-rugi belitan sangat rendah. Hal ini mengartikan bahwa rangkaian transformator dapat dimodelkan dari inti transformatornya saja. Dalam memodelkan inti sebagai induktansi non-linier, parameter yang diperlukan adalah kurva magnetisasi inti transformator.

Praktisnya, kurva magnetisasi inti menggambarkan hubungan antara arus magnetisasi (I_m) dengan *flux linkage* (λ). Untuk mendapatkan kurva tersebut, pengujian tanpa beban dilakukan seperti ditunjukkan pada Gambar 3.12. Tegangan primer dinaikkan secara bertahap hingga melebihi tegangan nominalnya (inti transformator bersaturasi). Besar arus dan daya primer dicatat untuk setiap nilai tegangan yang diberikan. Selanjutnya, nilai-nilai tersebut digunakan untuk mendapatkan arus magnetisasi dan *flux linkage* serta arus rugi-rugi berdasarkan persamaan-persamaan berikut:

$$PF = \cos \theta = \frac{P_p}{V_p \cdot I_p} \quad (3.2)$$

$$I_m = I_p \cdot \sin \theta \quad (3.3)$$

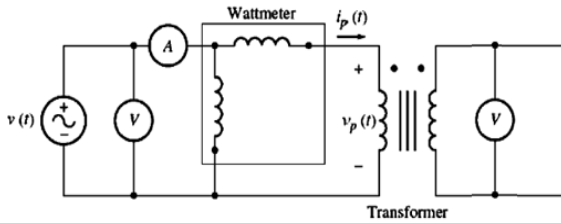
$$I_c = I_p \cdot \cos \theta \quad (3.4)$$

$$L_m = \frac{V_p}{I_p \cdot 2\pi \cdot f} \quad (3.5)$$

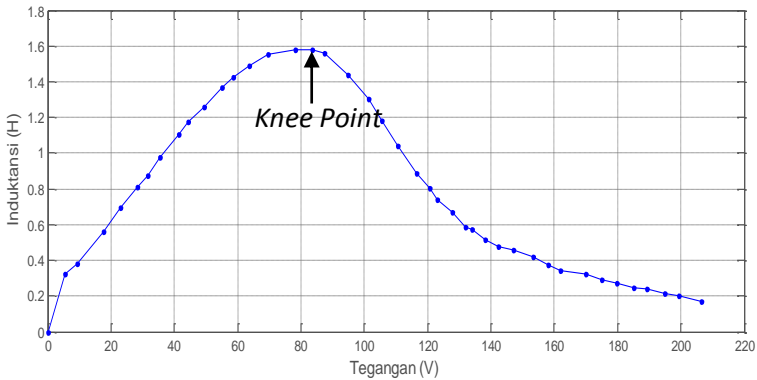
$$\lambda = I_m \cdot L_m \quad (3.6)$$

dimana:

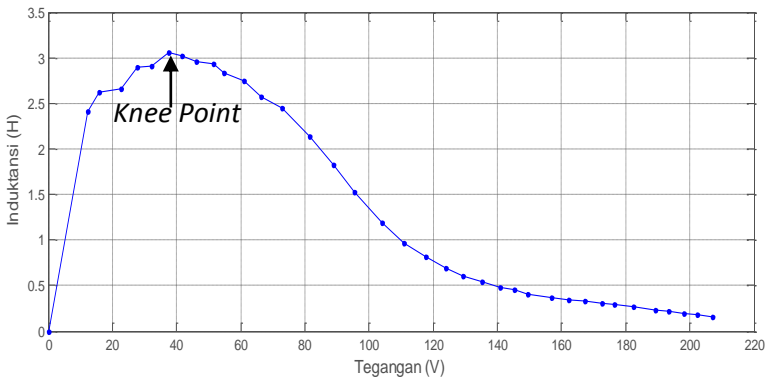
- P_p = daya sisi primer (W),
- V_p = tegangan sisi primer (V),
- I_p = arus sisi primer (A),
- I_c = arus rugi-rugi (A),
- I_m = arus magnetisasi (A),
- L_m = induktansi inti transformator (H),
- λ = *flux linkage* (Wb-T).



Gambar 3. 12 Rangkaian Pengujian Tanpa Beban [1]



Gambar 3. 13 Kecenderungan nilai induktansi terhadap tegangan pada transformator H



Gambar 3. 14 Kecenderungan nilai induktansi terhadap tegangan pada transformator M

Hasil pengujian kurva magnetisasi inti transformator H dan M tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.10 dan Gambar 3.11. Pada kurva yang diperoleh area non-saturasi yang ditandai oleh bentuk kurva curam (mendekati bentuk vertikal) dan saturasi yang ditandai oleh bentuk kurva landai (mendekati bentuk horisontal) dapat diamati secara jelas. Arus nominal dari kedua transformator didapatkan dari daya (VA) dibagi tegangan sisi primer yang diuji (110 V), sebesar 9.1 A. Namun pada arus sekitar 4 A sudah dapat menunjukkan kondisi saturasi. Di samping itu, pemberian tegangan transformator memang dibatasi hingga sekitar 205 V agar arus yang mengalir tidak melebihi arus nominal sumber tegangan (*trafo regulator*) yaitu sebesar 6.5 A. Kemiringan kurva magnetisasi inti merepresentasikan nilai induktansi transformator. Semakin curam bentuk kurva maka semakin besar induktansi, dan berlaku sebaliknya.

Kecenderungan nilai induktansi terhadap tegangan pada transformator satu fasa sangat berbeda antara inti H dan inti M. Gambar 3.13 menunjukkan bahwa peningkatan nilai induktansi terjadi pada tegangan sekitar 0 - 83 V. Kemudian nilai induktansi mengalami penurunan seiring dengan pemberian tegangan. Sedangkan Gambar 3.14 menunjukkan bahwa peningkatan nilai induktansi terjadi pada tegangan sekitar 0 - 38 V. Hal ini menunjukkan bahwa perbedaan jenis inti transformator mempengaruhi mulainya titik saturasi terjadi walaupun tegangan nominalnya sama. Transformator H dimulai pada tegangan senilai 83.5 V (*knee point*) sedangkan Transformator M senilai 37.5 V (*knee point*). Inti transformator H memerlukan waktu yang lebih lama untuk mencapai saturasi karena nilai induktansi maksimumnya adalah 1.58 H. Sedangkan inti transformator M memerlukan waktu yang lebih cepat untuk mencapai saturasi karena nilai induktansi maksimumnya adalah 3.06 H.

Di samping itu, besar kenaikan dan penurunan nilai induktansi terlihat tidak linier terhadap tegangan. Hal ini diamati dari kemiringan kurva induktansi yang tidak berbentuk garis lurus (linier).

3.3 Penentuan Nilai Kapasitansi

Pada penelitian [6], penentuan nilai kapasitansi didapatkan dengan menggunakan *Rudenberg's graphical method*. Metode ini didasari oleh rangkaian dasar feroresonansi yaitu susunan seri dari transformator (sebagai induktansi non-linier) dan kapasitor. Melalui metode tersebut, besar kapasitansi tersebut dapat diperkirakan orde atau kisaran nilai kapasitansi yang dapat menimbulkan feroresonansi. Sehingga dalam pengujian ini, penghitungan kapasitansi berdasarkan

Rudenberg's graphical method tidak ditujukan untuk memperoleh nilai kapasitansi secara spesifik. Ilustrasi penghitungan kapasitansi yang melibatkan kurva magnetisasi inti ditunjukkan pada Gambar 3.10 (transformator H) dan Gambar 3.11 (transformator M).

Kemiringan kurva linear V_C merepresentasikan reaktansi kapasitif, sedangkan reaktansi induktif non-linier direpresentasikan oleh kurva V_L [11]. Tegangan sumber ditunjukkan oleh garis horisontal yang bernilai E dari sumbu pusat. Perpotongan antara kurva linier V_C , kurva non-linier V_L , dan garis horisontal E dengan kurva linier V_C menyinggung area saturasi pada kurva V_L di kuadran satu akan memberikan titik A. Titik A tersebut menunjukkan tegangan dan arus kapasitor yang mampu menginisiasi respon feroresonansi dengan efek tegangan lebih. Selanjutnya, nilai kapasitansi dicari melalui Persamaan 3.7.

$$C = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_C} \quad (3.7)$$

dimana:

C = kapasitansi (F),
 I = arus kapasitor (A),
 f = frekuensi fundamental (50 Hz),
 V_C = tegangan kapasitor (V).

Pada Gambar 3.16 nilai-nilai absolut yang diperoleh pada titik A, antara lain: $\lambda_A = 0.48$ Wb-T (dikonversikan ke dalam besaran tegangan $V_L = 153.2$ V), $\lambda_E = 0.178$ Wb-T (dikonversikan ke dalam besaran tegangan $E = 63.8$ V), $V_C = E + V_L = 220$ V, dan $I = 1.17$ A. Selanjutnya, nilai-nilai tersebut dimasukkan ke dalam Persamaan 3.7, sehingga besar kapasitansi dapat dihitung sebagai berikut:

$$C = \frac{I}{2 \pi f V_C} = \frac{1.17}{2 \times 3.14 \times 50 \times 220} = 16.9 \mu F$$

Dengan mengacu pada nilai kapasitansi yang diperoleh, variasi kapasitansi yang dipilih untuk pengujian feroresonansi pada transformator satu fasa konfigurasi seri (*Cthevenin*) adalah 10 μF , 20 μF , 30 μF , dan 50 μF .

Pada konfigurasi seri-paralel yang melibatkan *Cseries* dan *Cshunt*, pemilihan *Cthevenin* diatas dilakukan kombinasi untuk nilai *Cthevenin* 20 μF , 30 μF , dan 50 μF . Kombinasi *Cthevenin* 10 μF tidak dilakukan karena 10 μF hanya memberikan indikasi atau gejala feroresonansi pada pengujian transformator H (lihat subbab 4.2.3). Kombinasi *Cseries* dan *Chunt* dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Pada Gambar 3.16 nilai-nilai absolut yang diperoleh pada titik A, antara lain: $\lambda_A = 0.58$ Wb-T (dikonversikan ke dalam besaran tegangan $V_L = 182$ V), $\lambda_E = 0.23$ Wb-T (dikonversikan ke dalam besaran tegangan $E = 72.8$ V), $V_c = E + V_L = 254.8$ V, dan $I = 2.18$ A. Selanjutnya, nilai-nilai tersebut dimasukkan ke dalam Persamaan 3.7, sehingga besar kapasitansi dapat dihitung sebagai berikut:

$$C = \frac{I}{2 \pi f V_C} = \frac{2.18}{2 \times 3.14 \times 50 \times 254.8} = 27.31 \text{ uF}$$

Dengan mengacu pada nilai kapasitansi yang diperoleh, variasi kapasitansi yang dipilih untuk pengujian feroresonansi pada transformator satu fasa adalah 20 uF, 30 uF, 50 uF, dan 100 uF. Konfigurasi seri-paralel pada studi ini melibatkan *Cseries* dan *Cshunt*, sehingga pemilihan *Cthevenin* diatas akan dilakukan kombinasi untuk nilai *Cthevenin* 20 uF, 30 uF, 50 uF, dan 100 uF. Kombinasi *Cseries* dan *Cshunt* dapat dilihat pada Table 3.4.

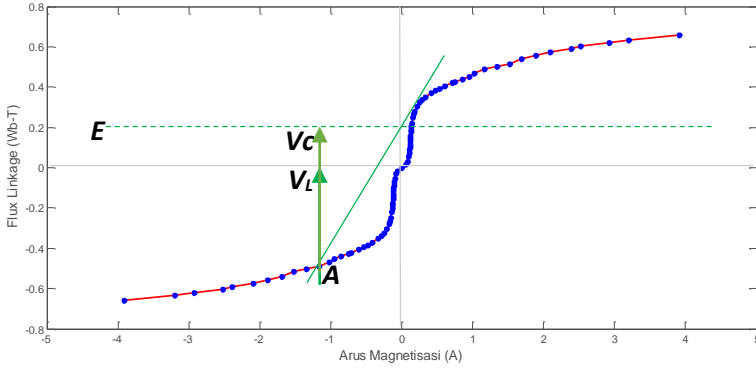
Secara keseluruhan, kombinasi *Cseries* dan *Cshunt* pada pengujian konfigurasi seri-paralel ini bertujuan untuk mencoba mendapatkan mode feroresonansi selain mode fundamental dari penelitian [6] dan mengacu penelitian berdasarkan simulasi [7] yang meringkas bahwa mode-mode feroresonansi dapat diperoleh lebih beragam untuk variasi *Cseries* daripada variasi *Cshunt*.

Tabel 3. 3 Kombinasi *Cseries* dan *Cshunt* Pengujian Transformtor H

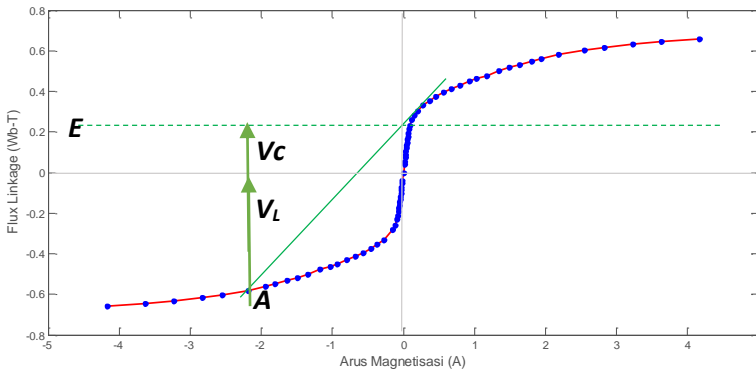
<i>Cthevenin</i> (uF)	<i>Cseries</i> (uF)	<i>Cshunt</i> (uF)
20	10	10
30	20	10
	10	20
50	30	20
	20	30

Tabel 3. 4 Kombinasi *Cseries* dan *Cshunt* Pengujian Transformtor M

<i>Cthevenin</i> (uF)	<i>Cseries</i> (uF)	<i>Cshunt</i> (uF)
20	10	10
30	20	10
	10	20
50	30	20
	20	30
100	50	50
	70	30
	30	70



Gambar 3. 15 Penghitungan Kapasitansi Pada Kurva Magnetisasi Inti Transformator H Berdasarkan *Rudenberg's Graphical Method*



Gambar 3. 16 Penghitungan Kapasitansi Pada Kurva Magnetisasi Inti Transformator M Berdasarkan *Rudenberg's Graphical Method*

3.4 Pengujian dan Pengolahan Data

Rangkaian pengujian feroresonansi pada transformator satu fasa mengacu pada penelitian [6]. Realisasi modul pengujian feroresonansi dapat dilihat di Gambar 3.4. Pada pengujian ini, tiga komponen besar akan dirangkai seperti Gambar 3.17. Sumber tegangan ($V_{output} = 0-220 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$, dan $I_{rated} = 7 \text{ A}$), modul pengujian, dan PC. Transformator pertama yang diuji memiliki inti H dan jenis material H18. Transformator kedua yang diuji memiliki inti M dan jenis material M10. Sisi sekunder transformator dalam kondisi tidak berbeban.

Skema pengujian feroresonansi konfigurasi seri pada Trafo H dan Trafo M yang dilakukan menyerupai penelitian [6]. Variasi yang diberikan adalah tegangan sumber (11 V - 110 V) dan kisaran kapasitansi masing-masing yang telah didapatkan dari *Rudenberg's graphical method*. Variasi tegangan sumber dilakukan dengan menaikkan tegangan secara bertahap dan kontinu dari 11 V hingga 110 V dengan *step* sebesar 10% terhadap tegangan nominal transformator. Untuk setiap variasi tegangan sumber, pengukuran meliputi: a) besar tegangan sumber, kapasitor, dan sisi primer transformator, b) besar arus transformator, dan perekaman gelombang tegangan primer transformator dilakukan.

Skema pengujian feroresonansi konfigurasi seri-paralel pada Trafo H dan Trafo M. Variasi yang diberikan adalah tegangan sumber (11 V - 165 V) dimana 1.5 kali tegangan rating transformator dan kombinasi kapasitansi sesuai Table 3.3 dan 3.4. Variasi tegangan sumber dilakukan dengan menaikkan tegangan secara bertahap dan kontinu dari 11 V hingga 165 V dengan *step* sebesar 10% terhadap tegangan nominal transformator. Untuk setiap variasi tegangan sumber, pengukuran akan dilakukan sama seperti skema pengujian feroresonansi konfigurasi seri.

Pengujian feroresonansi dalam studi ini didasarkan oleh peristiwa *energize* transformator yang merupakan salah satu bentuk *trigger* dari kejadian transien. Sehingga di pengujian ini dilakukan cara *trigger* yang sama yaitu menutup MCB (*switching off*). Efek fluks sisa transformator diminimalisir di setiap pengujian dengan cara menurunkan tegangan sumber secara perlahan hingga 0 V. Kemudian sisi primer transformator dihubungkan seri dengan resistor (1 ohm) dan kapasitor (40 uF).

Diagram alur pengujian dan pengolahan data ditunjukkan pada Gambar 3.18. Perekaman data dilakukan dengan menggunakan perangkat akuisisi data, yaitu sensor tegangan Verivolt, National Instrument - *Compact Data Acquisition* (NI cDAQ) seri 9223, dan program LabView. Dengan menggunakan LabView, sinyal feroresonansi diekspor ke program DIAdem untuk pemotongan dan pengolahan sinyal berbasis *fast fourier transform* (FFT).

Proses akuisisi data pada LabView melibatkan diagram blok *DAQ Assistance*. Melalui diagram blok tersebut, sensor tegangan Verivolt dan NI cDAQ seri 9223 dapat diintegrasikan dengan LabView. Di samping itu, frekuensi sampling pada NI cDAQ diatur sebesar 100 kHz. Besar frekuensi tersebut dilakukan pada penelitian [6] yang terbukti mampu merekam secara akurat data gelombang tegangan transformator.

Frekuensi sampling sebesar 100 kHz berarti bahwa terdapat 10^5 titik sampel dalam satu detik atau 2000 titik sampel dalam satu periode (frekuensi fundamental = 50 Hz).

Pengolahan sinyal berbasis FFT pada DIAdem memanfaatkan fitur *signal analysis*, yaitu *fast fourier transform (one time signal)*. Sinyal yang diolah pada FFT sebesar satu periode dengan nilai pada sumbu X adalah waktu (s) dan nilai pada sumbu Y adalah magnitudo tegangan (V). Keluaran FFT pada DIAdem adalah spektrum harmonisa (frekuensi) dengan sumbu X adalah frekuensi (Hz) dan sumbu Y adalah amplitudo tegangan (V). Spektrum harmonisa tersebut dapat mengklasifikasi mode feroresonansi yang muncul pada pengujian ini. Kemudian hasil spektrum harmonisa menjadi data kuantitatif untuk menghitung THD (*Total Harmonic Distortion*) gelombang tegangan trafo hasil respon feroresonansi dengan persamaan 3.7.

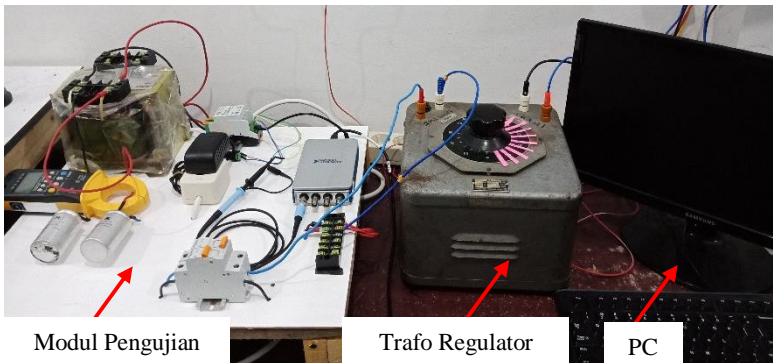
$$THD_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + V_5^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \quad (3.7)$$

dimana:

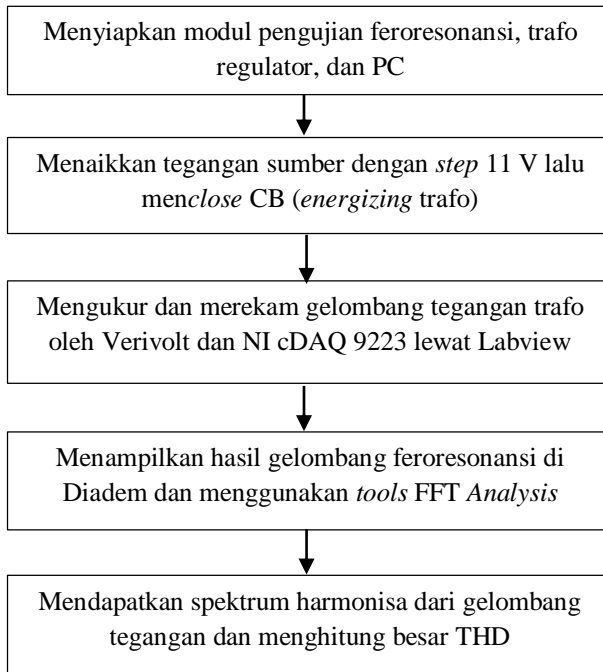
THD_V = Total Halmonic Distortion Tegangan (%)

V_1 = Amplitudo Tegangan di frekuensi fundamental (50 Hz)

V_n = Amplitudo Tegangan di frekuensi non-fundamental ke-n (Hz)



Gambar 3. 17 Pengujian Feroresonansi



Gambar 3. 18 Alur pengujian dan pengolahan data

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

HASIL PENGUJIAN DAN ANALISA

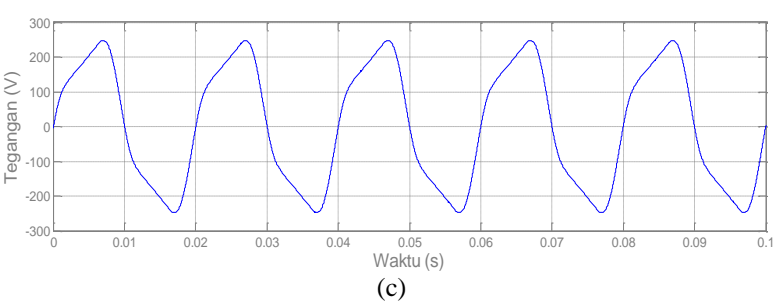
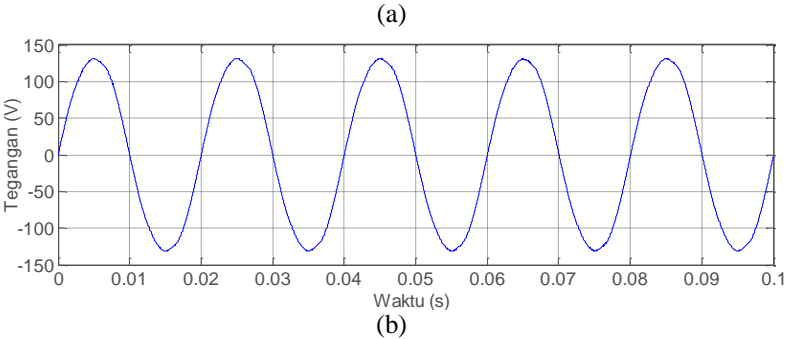
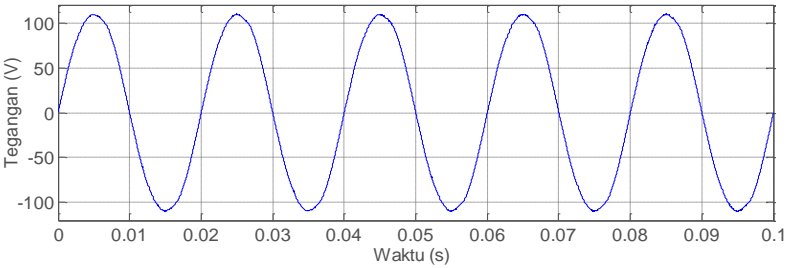
4.1 Pengujian Feroresonansi pada Konfigurasi Seri

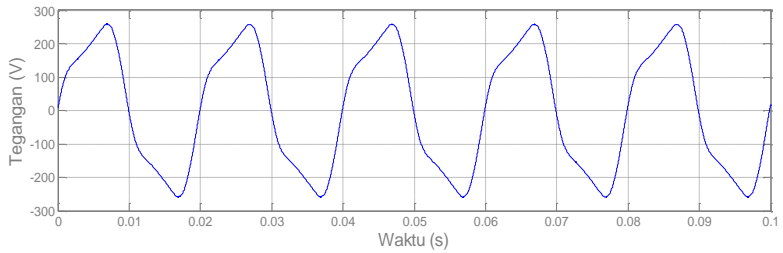
Pengujian feroresonansi telah digunakan dengan menghubungkan seri transformator dan kapasitor dalam kurun waktu ± 1 bulan. Tegangan sumber dibatasi sampai 110 V ($100 \% V_{rated}$). Hal ini dikarenakan faktor keamanan dari peralatan yang digunakan. Tegangan sumber berupa transformator regulator memiliki arus nominal 7 A. Pada pengujian transformator M dengan nilai kapasitansi 100 μ F, arus transformator sampai 12.8 A (melebihi arus nominal trafo regulator).

4.1.1 Tegangan Permulaan Feroresonansi Akibat Perbedaan Tipe Jenis Inti Transformator

Pengujian feroresonansi pada studi ini didasarkan pada dua macam tipe inti transformator satu fasa yang berbeda. Pada bab sebelumnya telah disebutkan bahwa Trafo M dan Trafo H mempunyai kurva magnetisasi yang berbeda. Gambar 4.1 dan 4.2 menunjukkan respon feroresonansi dengan kapasitor yang sama, 30 μ F. Bentuk gelombang tegangan transformator di kedua jenis inti terlihat sama ketika munculnya feroresonansi. Pada trafo jenis inti M, gelombang feroresonansi sudah muncul saat tegangan sumbernya 77 V ($70\% V_{rated}$). Sementara, gelombang feroresonansi muncul saat tegangan sumber 88 V ($80\% V_{rated}$) pada trafo jenis inti H. Kemudian gelombang feroresonansi tetap muncul seiring kenaikan presentase tegangan sumber terhadap tegangan nominal transformator. Mode feroresonansi yang muncul adalah fundamental. Perbedaan ini menunjukkan bahwa trafo jenis inti M lebih cepat menimbulkan gelombang feroresonansi daripada trafo jenis inti H. Hal ini dikarenakan trafo jenis inti M mempunyai knee point (titik peralihan) dari area linear ke area non-linear (saturasi) di tegangan 37.5 V. *Knee point* trafo jenis inti M lebih rendah dari *knee point* trafo jenis inti H (83.5 V). Oleh karena itu, saat tegangan sumber 77 V (tegangannya lebih dari 37.5 V), trafo M sudah berada di area saturasinya. Dengan parameter kisaran nilai kapasitor yang pas dan dipicu oleh *switching (closed)*, feroresonansi dapat muncul di tegangan sumber yang lebih kecil dari tegangan sumber trafo H (88 V).

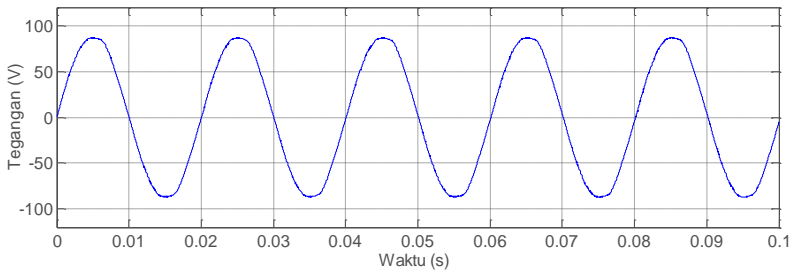
Hal ini didasari oleh inti M mempunyai rugi-rugi besi lebih kecil dibanding inti H karena inti M lebih murni dari inti H. Rugi-rugi besi seperti rugi histerisis, besarnya dipengaruhi oleh pemilihan bahan inti. Semakin murni suatu bahan inti, semakin kecil rugi histerisis yang muncul.



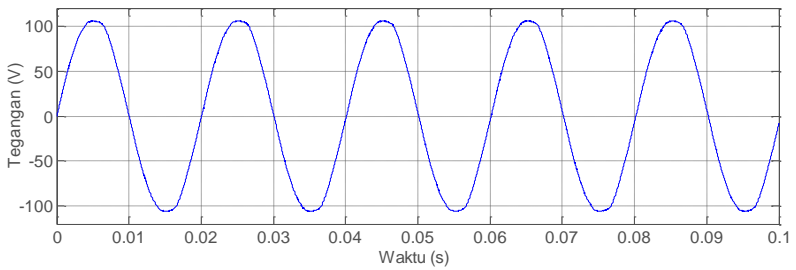


(d)

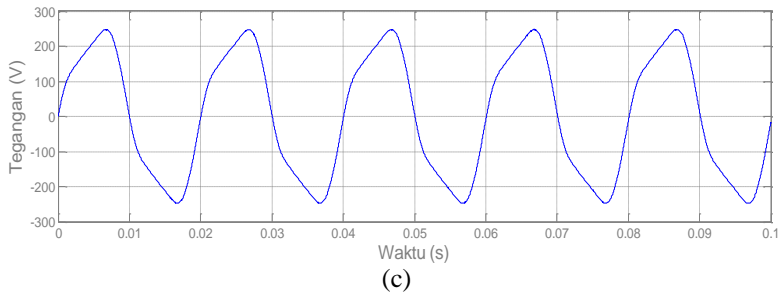
Gambar 4. 1 Bentuk respon feroresonansi gelombang tegangan transformator H diseri kapasitor 30 uF pada tegangan sumber (a) 66 V, (b) 77 V, (c) 88 V, (d) 99 V.



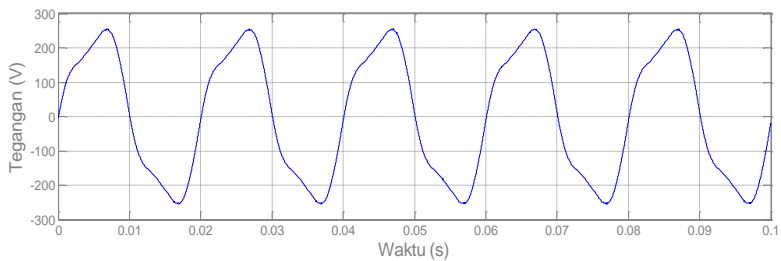
(a)



(b)



(c)

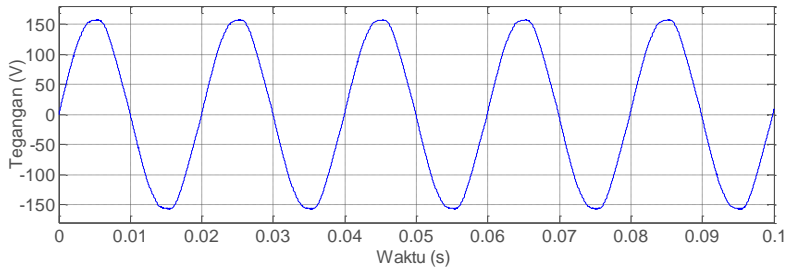


(d)

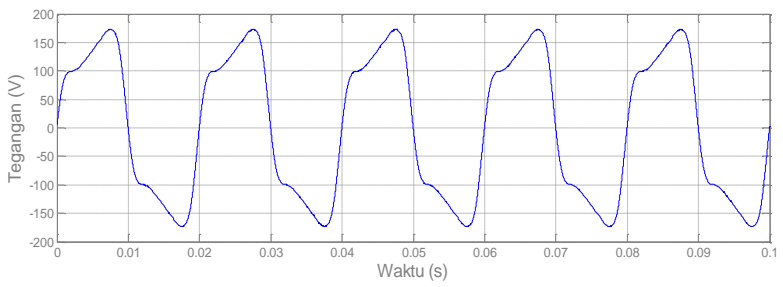
Gambar 4. 2 Bentuk respon feroresonansi gelombang tegangan transformator M diseri kapasitor 30 uF pada tegangan sumber (a) 55 V, (b) 66 V, (c) 77 V, (d) 88 V.

4.1.2 Distorsi Gelombang Tegangan Transformator sebagai Respon Feroresonansi Akibat Variasi Kapasitor

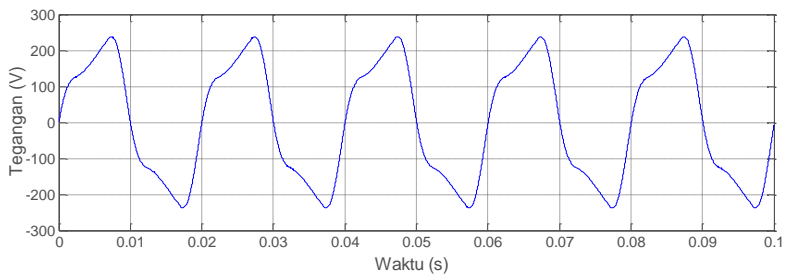
Semakin tinggi nilai kapasitor, semakin terlihat cacat gelombangnya. Range kapasitansi yang diujikan berbeda untuk kedua trafo karena mempertimbangkan kurva magnetisasi masing-masing trafo. Pada trafo H dan M, distorsi bentuk gelombang semakin terlihat jelas seiring dengan peningkatan nilai kapasitansi untuk tegangan sumber yang tetap yaitu 110 V. Distorsi tersebut diamati sebagai puncak gelombang yang seolah-olah terbelah menjadi dua seperti ditunjukkan pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4. Bentuk puncak gelombang terbelah dua menyerupai bentuk gelombang terdistorsi pada variasi kapasitansi lainnya. Di samping itu, besar amplitude puncak semakin tinggi terhadap bertambahnya nilai kapasitansi. Secara keseluruhan, bentuk gelombang feroresonansi yang muncul masih termasuk kategori mode fundamental.



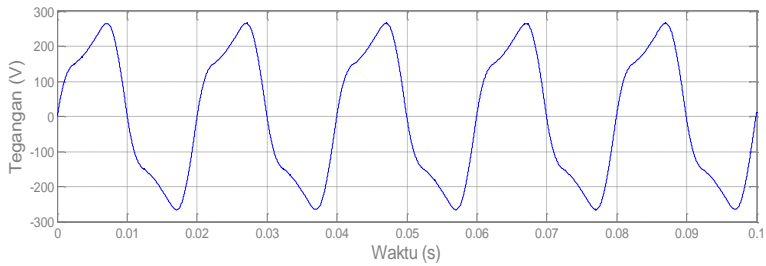
(a)



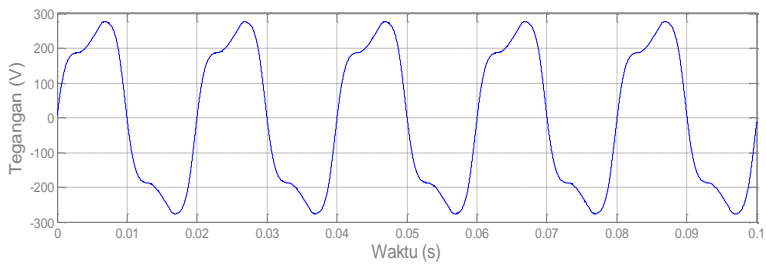
(b)



(c)

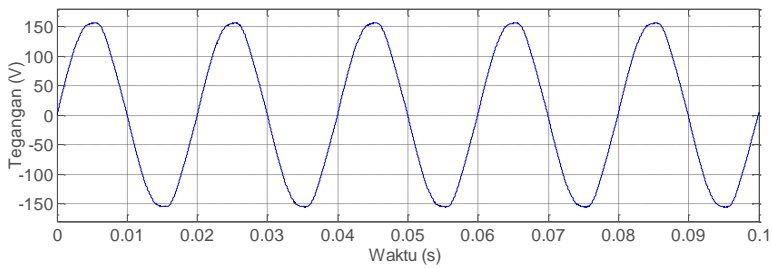


(d)

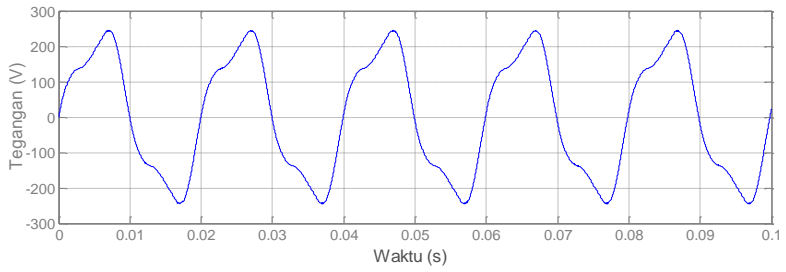


(e)

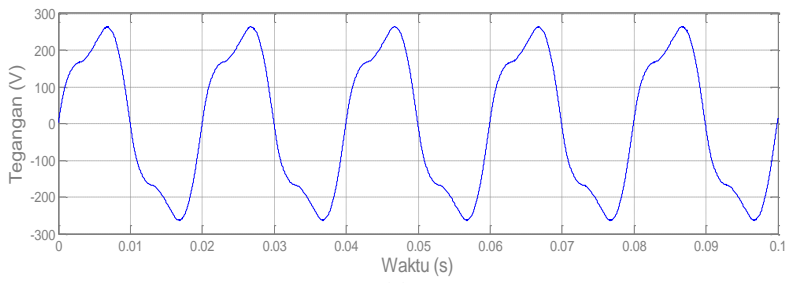
Gambar 4. 3 Bentuk respon feroresonansi gelombang tegangan transformator H pada tegangan sumber 110 V hubung seri dengan kapasitor (a) tanpa kapasitor, (b) 10 uF, (c) 20 uF, (d) 30 uF, (e) 50 uF.



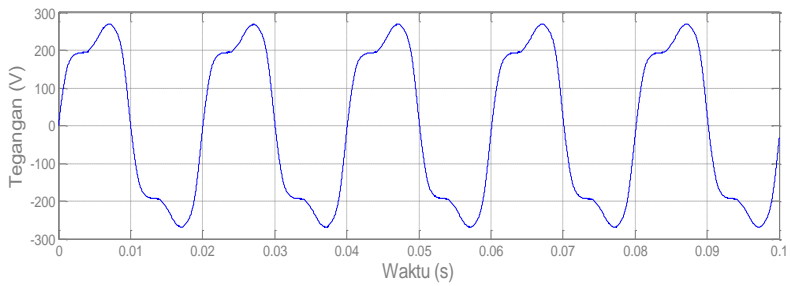
(a)



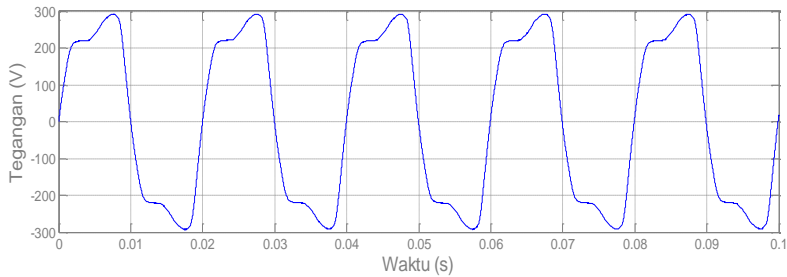
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 4. 4 Bentuk respon feroresonansi gelombang tegangan transformator M pada tegangan sumber 110 V hubung seri dengan kapasitor (a) tanpa kapasitor, (b) 20 uF, (c) 30 uF, (d) 50 uF, (e) 100 uF.

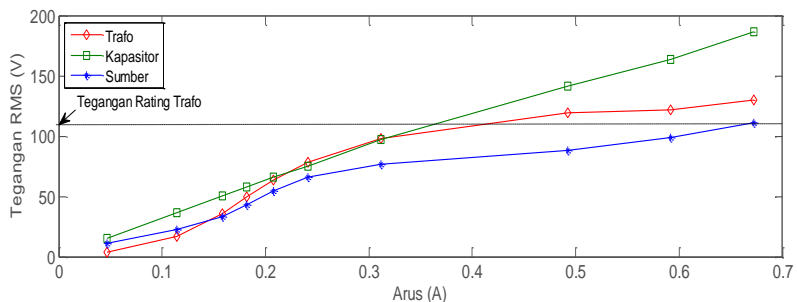
4.1.3 *Jump Phenomenon* pada Pengukuran Transformator

Karakteristik *jump phenomenon* pada setiap nilai kapasitansi dapat dilihat dari grafik kurva kecenderungan tegangan RMS (sumber, kapasitor, dan transformator) terhadap arus. Salah satu karakteristik fisik feroresonansi adalah terjadi *jump phenomenon* dimana terjadi loncatan arus transformator secara tiba-tiba setelah dipicu oleh kejadian transien. Pada trafo H dengan kapasitansi 10 uF, *jump phenomenon* terjadi pada tegangan sumber 77 V (70% V_{rated}) ke 88 V (80% V_{rated}). Namun kenaikan arus tidak terlalu signifikan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5, (0.312 A ke 0.492 A). Hal ini termasuk indikasi *jump phenomenon* di nilai kapasitansi 10 uF yang berada di bawah kisaran nilai kapasitansi yang dapat memunculkan feroresonansi. Kenaikan arus kembali berubah naik secara signifikan untuk variasi kapasitansi lainnya. Pada nilai kapasitansi 20 uF, *jump phenomenon* terjadi pada tegangan sumber 66 V (60% V_{rated}) ke 77 V (70% V_{rated}). Gambar 4.6 menunjukkan bahwa adanya kenaikan arus secara tiba-tiba yang signifikan dari 0.256 A ke 1.2 A. Pada nilai kapasitansi 30 uF, *jump phenomenon* terjadi pada tegangan sumber 77 V (70% V_{rated}) ke 88 V (80% V_{rated}). Gambar 4.7 menunjukkan bahwa adanya kenaikan arus secara tiba-tiba yang signifikan dari 0.298 A ke 2.18 A. Dan di nilai kapasitansi 50 uF, *jump phenomenon* terjadi pada tegangan sumber 88 V (80% V_{rated}) ke 99 V (90% V_{rated}). Gambar 4.8 menunjukkan bahwa adanya kenaikan arus secara tiba-tiba yang signifikan dari 0.363 A ke 5.11 A.

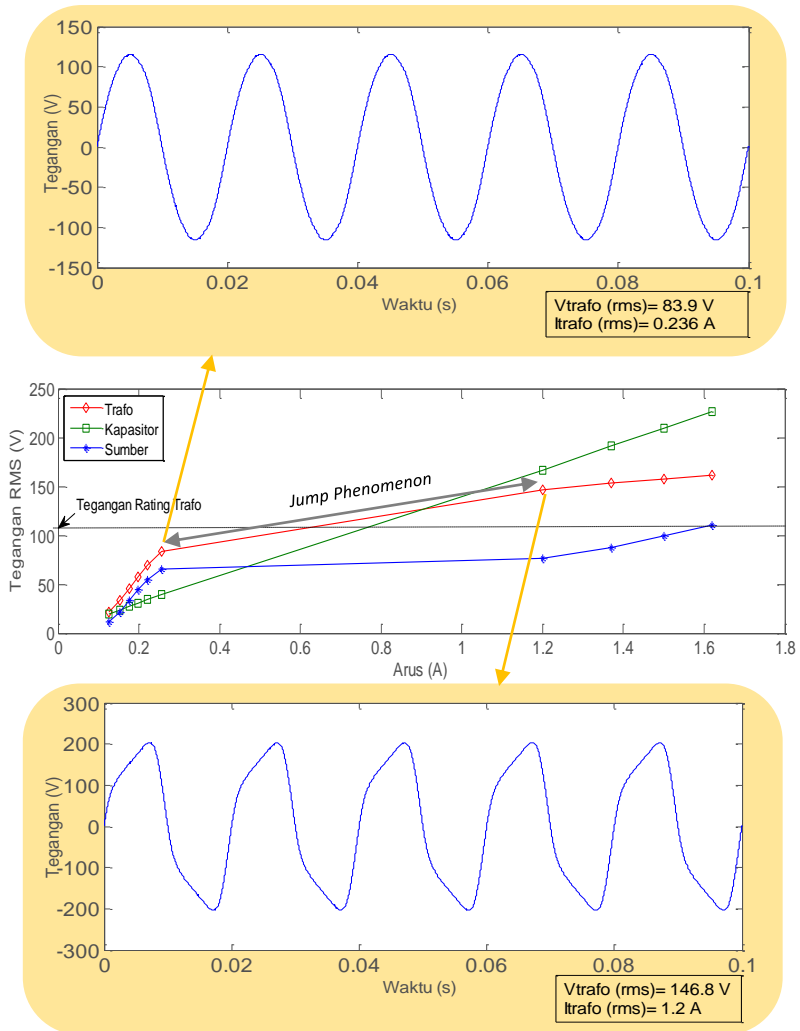
Karakteristik *jump phenomenon* juga terjadi pada trafo M. Pada trafo M dengan nilai kapasitansi 20 uF dan 30 uF, *jump phenomenon*

terjadi pada tegangan sumber 66 V (60% V_{rated}) ke 77 V (70% V_{rated}). Gambar 4.9 menunjukkan bahwa adanya kenaikan arus secara tiba-tiba yang signifikan dari 0.163 A ke 1.35 A. Dan gambar 4.10 menunjukkan bahwa adanya kenaikan arus secara tiba-tiba yang signifikan dari 0.135 A ke 2.14 A. Hal yang berbeda terjadi pada nilai kapasitansi 20 μF karena nilainya berada di bawah kisaran nilai kapasitansi yang diperoleh. Hal ini dikarenakan garis linear V_c mengenai daerah saturasi yang paling landai pada Gambar 3.16. Semakin landai kemiringan kurva magnetisasi yang berhimpitan dengan garis linear V_c , kemungkinan fenomena feroresonansi terjadi lebih besar (daerah saturasi). Pada nilai kapasitansi 50 μF , *jump phenomenon* terjadi pada tegangan sumber 77 V (70% V_{rated}) ke 88 V (80% V_{rated}). Gambar 4.11 menunjukkan bahwa adanya kenaikan arus secara tiba-tiba yang signifikan dari 0.169 A ke 4.78 A. Pada nilai kapasitansi 100 μF , *jump phenomenon* terjadi pada tegangan sumber 99 V (90% V_{rated}) ke 110 V (100% V_{rated} trafo). Gambar 4.12 menunjukkan bahwa adanya kenaikan arus secara tiba-tiba yang signifikan dari 0.424 A ke 12.8 A.

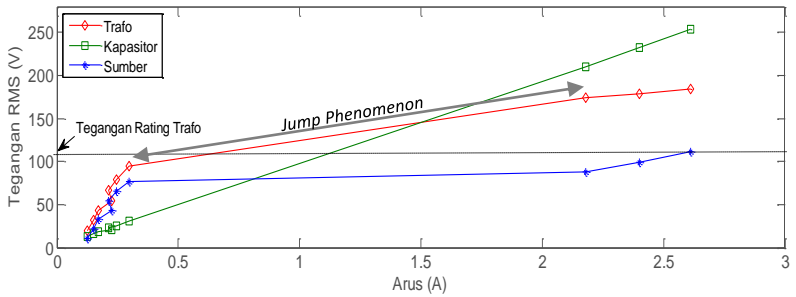
Variasi tegangan sumber yang diinjeksikan ke rangkaian pengujian feroresonansi dapat membantu peneliti untuk melihat ada atau tidaknya *jump phenomenon*. Selisih arus pada *jump phenomenon* berbanding lurus dengan semakin tingginya nilai kapasitor yang terhubung dengan transformator karena semakin besarnya muatan kapasitor yang berinteraksi dengan ketidaklinearan transformator.



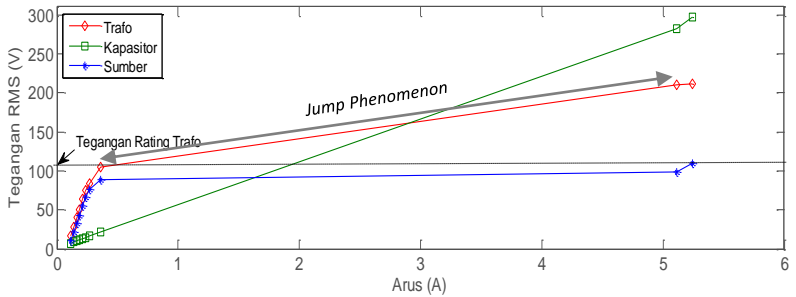
Gambar 4. 5 Pengukuran Transformator H dengan kapasitor 10 μF



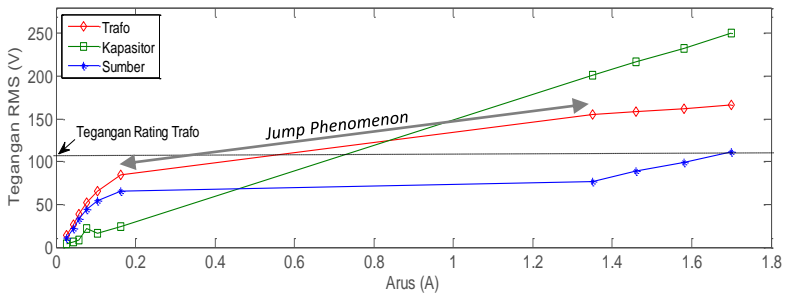
Gambar 4. 6 Pengukuran Transformator H dengan kapasitor 20 uf (Hubungan antara *Jump phenomenon* dengan Bentuk Gelombang Tegangan Tranformator)



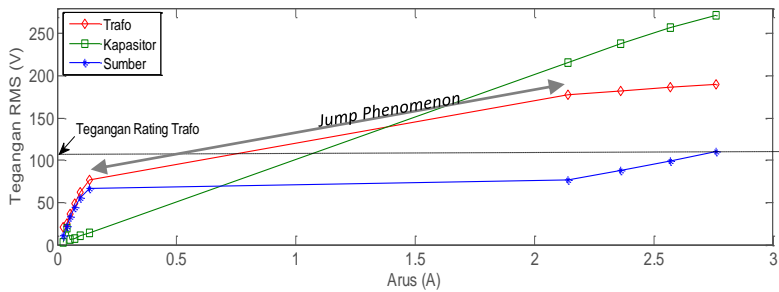
Gambar 4. 7 Pengukuran Transformator H dengan kapasitor 30 uF



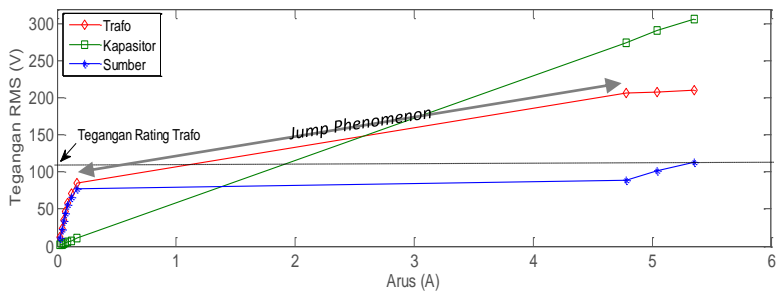
Gambar 4. 8 Pengukuran Transformator H dengan kapasitor 50 uF



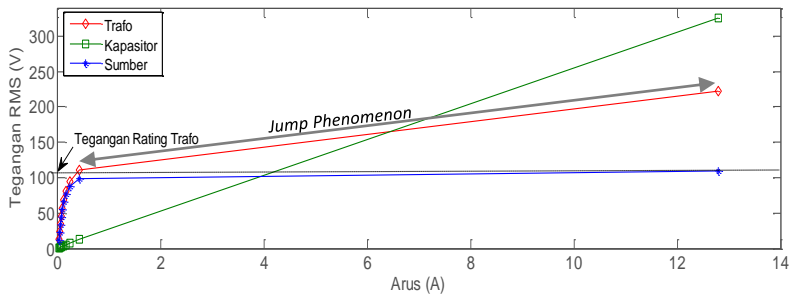
Gambar 4. 9 Pengukuran Transformator M dengan kapasitor 20 uF



Gambar 4. 10 Pengukuran Transformator M dengan kapasitor 30 μF



Gambar 4. 11 Pengukuran Transformator M dengan kapasitor 50 μF



Gambar 4. 12 Pengukuran Transformator M dengan kapasitor 100 μF

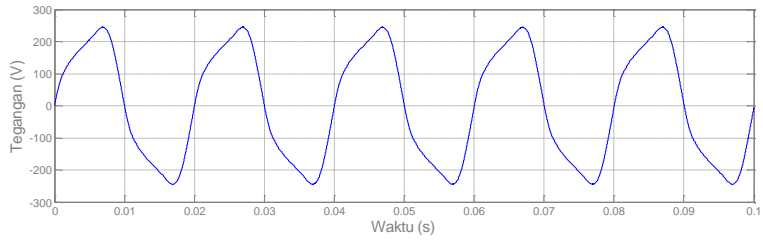
4.2 Pengujian Feroresonansi pada Konfigurasi Seri-Paralel

Pengujian feroresonansi telah digunakan dengan menghubungkan transformator dengan kapasitor seri dan kapasitor paralel, dalam kurun waktu ± 1 bulan. Tegangan sumber dibatasi sampai 165 V (150 % V_{rated}). Hal ini melihat pertimbangan faktor keamanan dari peralatan-peralatan yang digunakan. Tegangan sumber berbentuk transformator regulator dengan arus nominal 7 A. Pada pengujian transformator M dengan nilai kapasitansi C_{series} 70 uF dan C_{shunt} 30 uF, arus transformator sampai 12.3 A (melebihi arus nominal trafo regulator).

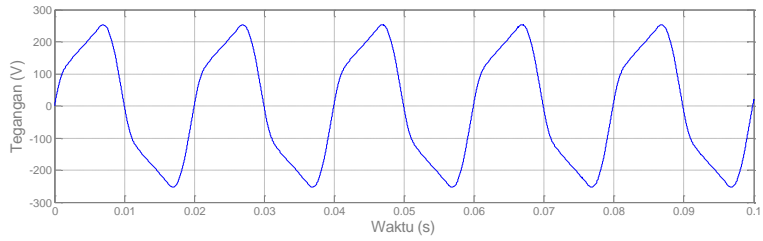
4.2.1 Tegangan sumber \geq tegangan rating transformator untuk mendapatkan respon feroresonansi

Untuk melihat bentuk gelombang tegangan hasil respon feroresonansi pada konfigurasi seri-paralel, dibutuhkan tegangan sumber yang melebihi tegangan rating transformator. Hal ini dikarenakan kombinasi efek muatan dari C_{series} dan C_{shunt} dalam memunculkan feroresonansi. Seperti contoh pada pengujian trafo H dan M berkonfigurasi seri-paralel (C_{series} 20 uF dan C_{shunt} 10 uF). Gambar 4.13 menunjukkan contoh feroresonansi mode fundamental muncul pada tegangan sumber 110% - 150% terhadap tegangan rating trafo di jenis inti H dengan konfigurasi seri-paralel. Pada tegangan sumber 121 V (110% V_{rated}) hingga 165 V (150% V_{rated}), terlihat bahwa amplitude puncak bernilai hampir sama. Hal ini menunjukkan bahwa setelah *jump phenomenon* (110 V ke 121 V) terjadi, peningkatan tegangan rms dan arus trafo hanya sedikit tetapi kecacatan gelombang akan semakin terlihat dimana puncak dari gelombang seakan-akan terbelah menjadi dua.

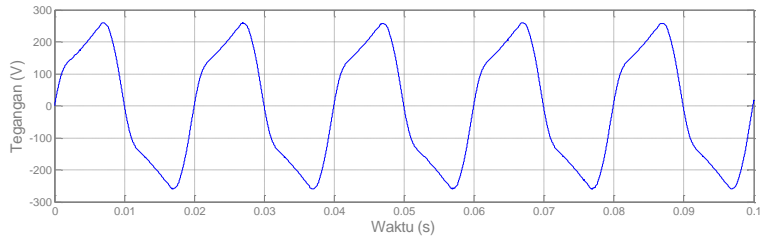
Gambar 4.14 menunjukkan contoh feroresonansi mode fundamental muncul pada tegangan sumber 100%-150% terhadap tegangan rating trafo di jenis inti M dengan konfigurasi seri-paralel. Dan dapat dilihat juga melalui Gambar 4.14, gelombang tegangan trafo hasil respon feroresonansi akan semakin terdistorsi seiring dengan peningkatan tegangan sumber. Pada tegangan sumber 110 V (100% V_{rated}) hingga 165 V (150% V_{rated}), terlihat bahwa amplitude puncak bernilai hampir sama. Hal ini menunjukkan bahwa setelah *jump phenomenon* (99 V ke 110 V) terjadi, peningkatan tegangan rms dan arus trafo hanya sedikit namun kecacatan gelombang akan semakin terlihat.



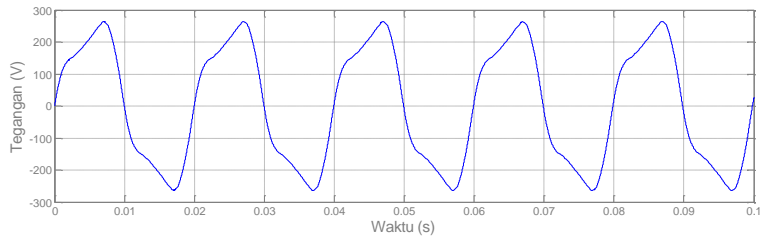
(a)



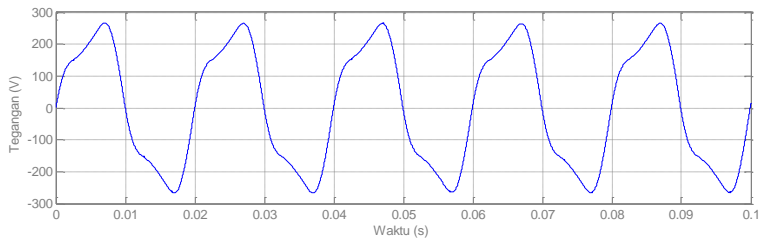
(b)



(c)

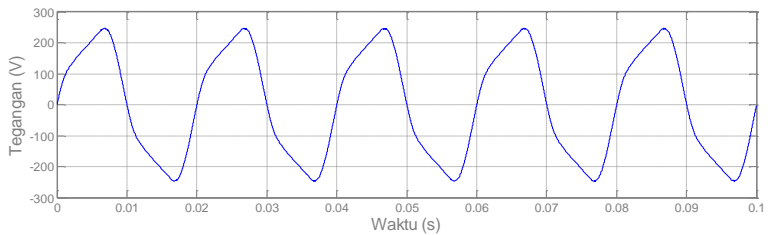


(d)

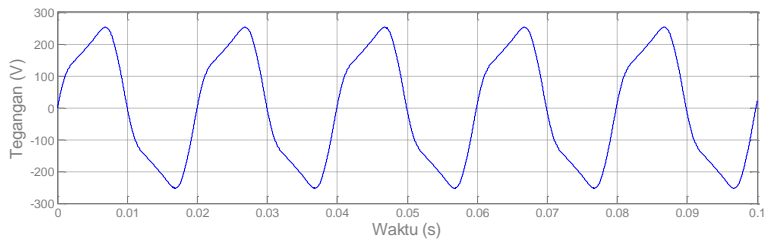


(e)

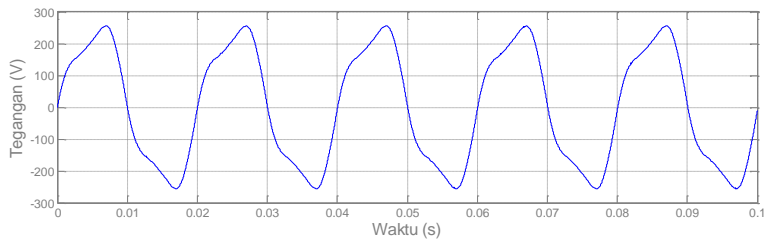
Gambar 4. 13 Bentuk respon feroresonansi gelombang tegangan transformator H dihubungkan dengan C_{series} 20 μF dan C_{shunt} 10 μF di tegangan sumber (a) 121 V, (b) 132 V, (c) 143 V, (d) 154 V (e) 165 V.



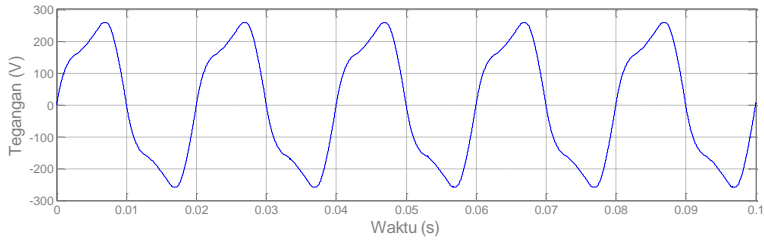
(a)



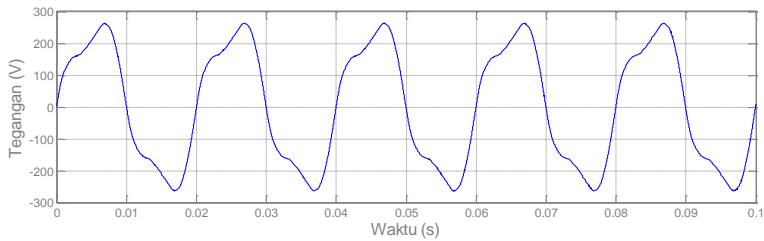
(b)



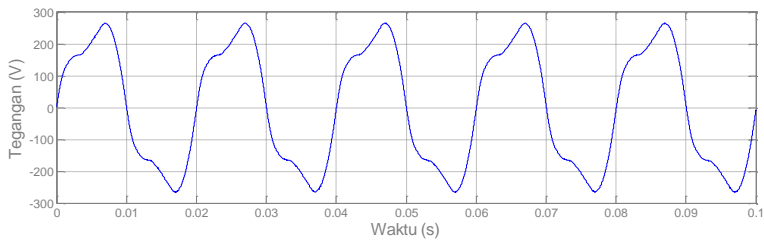
(c)



(d)



(e)



(f)

Gambar 4. 14 Bentuk respon feroresonansi gelombang tegangan transformator M dihubungkan dengan C_{series} 20 μF dan C_{shunt} 10 μF di tegangan sumber (a) 110 V, (b) 121 V, (c) 132 V, (d) 143 V, (e) 154 V, (f) 165 V.

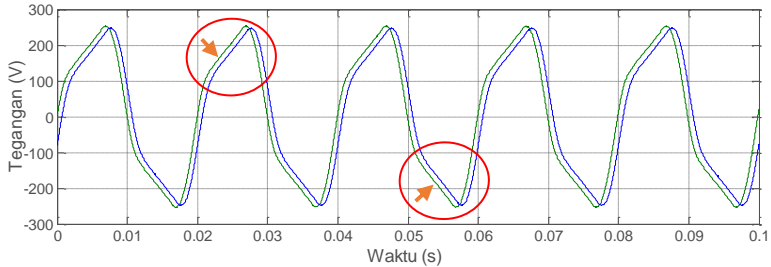
4.2.2 Perbandingan $C_{series}+C_{shunt}$ dan $C_{thevenin}$ dalam mendapatkan respon feroresonansi

Respon feroresonansi konfigurasi seri-paralel (C_{series} 20 μF dan C_{shunt} 10 μF) dibandingkan dengan respon konfigurasi seri (30 μF) pada inti trafo yang sama. Gambar 4.15 (inti H) dan Gambar 4.16 (inti M) menunjukkan bahwa tegangan trafo hasil respon feroresonansi dengan konfigurasi seri-paralel di tegangan sumber 132 V (120% V_{rated})

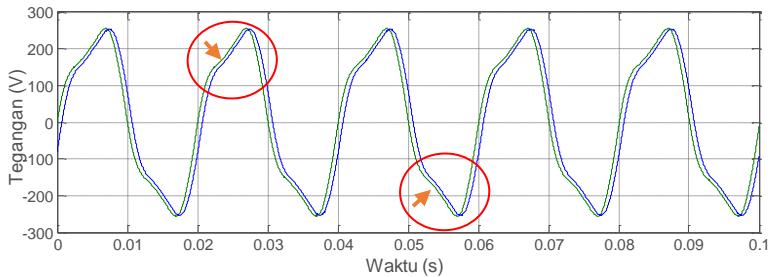
mempunyai respon feroresonansi yang sama (mode fundamental, distorsi gelombang dan amplitude tegangan) dengan konfigurasi seri di tegangan sumber 88 V (80% V_{rated}). Gambar 4.17 (inti H) dan Gambar 4.18 (inti M) berkonfigurasi seri-paralel (C_{series} 20 uF dan C_{shunt} 10 uF) di tegangan sumber berbeda yaitu 165 V (150% V_{rated}), juga menunjukkan hal yang serupa dengan konfigurasi seri di tegangan sumber 110 V (100% V_{rated}). Hal ini dibuktikan dengan perhitungan Persamaan 3.1. Sehingga diperoleh 30 uF ($C_{thevenin}$) \approx 20 uF (C_{series}) + 10 uF (C_{shunt}).

$$\begin{aligned} V_{th} &= \frac{20}{30} \times 132 \text{ V} \\ &= 88 \text{ V} \\ V_{th} &= \frac{20}{30} \times 165 \text{ V} \\ &= 110 \text{ V} \\ V_{th} &= \frac{30}{50} \times 165 \text{ V} \\ &= 99 \text{ V} \end{aligned}$$

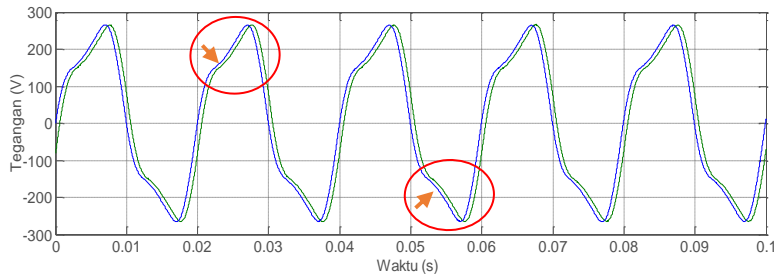
Respon feroresonansi konfigurasi seri-paralel (C_{series} 30 uF dan C_{shunt} 20 uF) juga dibandingkan dengan respon konfigurasi seri (50 uF) pada inti trafo yang sama. Gambar 4.19 (inti H) dan Gambar 4.20 (inti M) menunjukkan bahwa tegangan trafo hasil respon feroresonansi dengan konfigurasi seri-paralel di tegangan sumber 165 V (150% V_{rated}) mempunyai respon feroresonansi yang sama (mode fundamental, lekungan distorsi gelombang dan amplitude tegangan) dengan konfigurasi seri di tegangan sumber 99 V (90% V_{rated}). Melalui perhitungan Persamaan 3.1, diperoleh $C_{thevenin}$ 50 uF sebanding nilai kapasitansinya dengan C_{series} 30 uF dan C_{shunt} 20 uF. Hal ini bergantung pada pembagi tegangan antara perbandingan C_{series} dan $C_{thevenin}$ ($C_{series}+C_{shunt}$) di konfigurasi seri-paralel untuk mendapatkan tegangan sumber ($V_{thevenin}$) yang dapat menimbulkan feroresonansi di konfigurasi seri ($C_{thevenin}$).



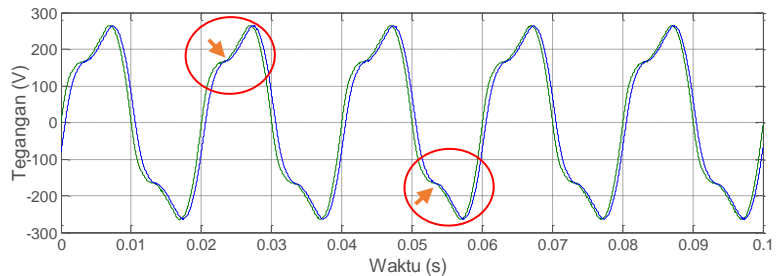
Gambar 4. 15 Bentuk respon feroresonansi gelombang tegangan transformator H dengan: a). Konfigurasi seri-paralel C_{series} 20 μF dan C_{shunt} 10 μF di tegangan sumber 132 V (Hijau) b). Konfigurasi $C_{thevenin}$ 30 μF di tegangan sumber 88 V (Biru).



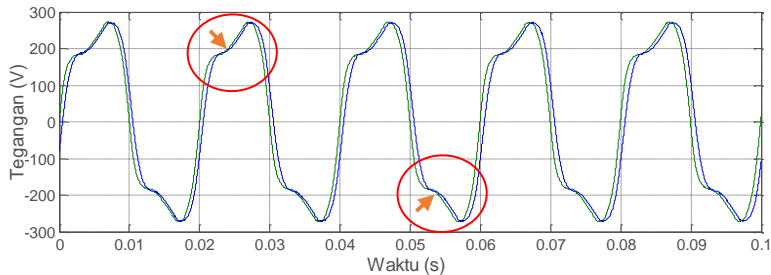
Gambar 4. 16 Bentuk respon feroresonansi gelombang tegangan transformator M dengan: a). Konfigurasi seri-paralel C_{series} 20 μF dan C_{shunt} 10 μF di tegangan sumber 132 V (Hijau) b). Konfigurasi $C_{thevenin}$ 30 μF di tegangan sumber 88 V (Biru).



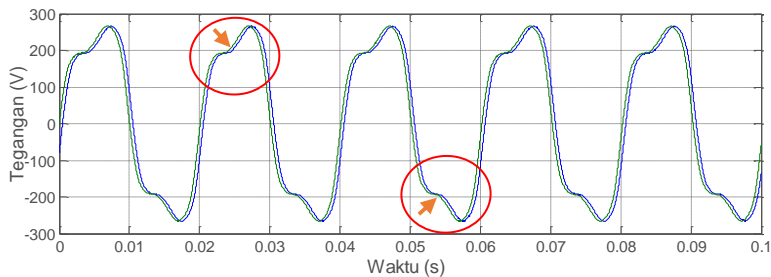
Gambar 4. 17 Bentuk respon feroresonansi gelombang tegangan transformator H dengan: a). Konfigurasi seri-paralel C_{series} 20 μF dan C_{shunt} 10 μF di tegangan sumber 165 V (Hijau) b). Konfigurasi $C_{thevenin}$ 30 μF di tegangan sumber 110 V (Biru).



Gambar 4. 18 Bentuk respon feroresonansi gelombang tegangan transformator M dengan: a). Konfigurasi seri-paralel C_{series} 20 μF dan C_{shunt} 10 μF di tegangan sumber 165 V (Hijau) b). Konfigurasi $C_{thevenin}$ 30 μF di tegangan sumber 110 V (Biru)



Gambar 4. 19 Bentuk respon feroresonansi gelombang tegangan transformator H dengan: a). Konfigurasi seri-paralel C_{series} 30 μF dan C_{shunt} 20 μF di tegangan sumber 165 V (Hijau) b). Konfigurasi $C_{thevenin}$ 50 μF di tegangan sumber 99 V (Biru).



Gambar 4. 20 Bentuk respon feroresonansi gelombang tegangan transformator M dengan: a). Konfigurasi seri-paralel C_{series} 30 μF dan C_{shunt} 20 μF di tegangan sumber 165 V (Hijau) b). Konfigurasi $C_{thevenin}$ 50 μF di tegangan sumber 99 V (Biru).

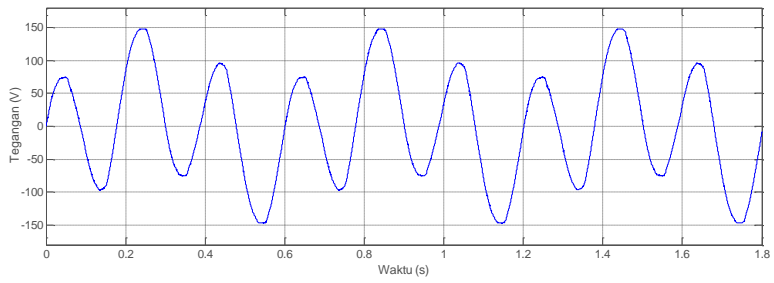
4.2.3 Pengaruh ratio C_{series} dan C_{shunt} terhadap munculnya respon feroresonansi

Konfigurasi seri-paralel dengan C_{series} lebih besar daripada C_{shunt} berpengaruh lebih banyak untuk memunculkan respon feroresonansi. Seperti contoh hasil pengujian trafo M berkonfigurasi seri-paralel (C_{series} 70 μF dan C_{shunt} 30 μF) ini. Gambar 4.21 adalah contoh mode feroresonansi subharmonic di tegangan sumber 88 V (80% V_{rated}) hingga 110 V (100% V_{rated}). Kemudian pada tegangan sumber 154 V (140% V_{rated}), gelombang tegangan trafo kembali menjadi mode fundamental dengan distorsi gelombang yang sangat terlihat. Jika dibandingkan dengan hasil pengujian dengan konfigurasi seri-paralel

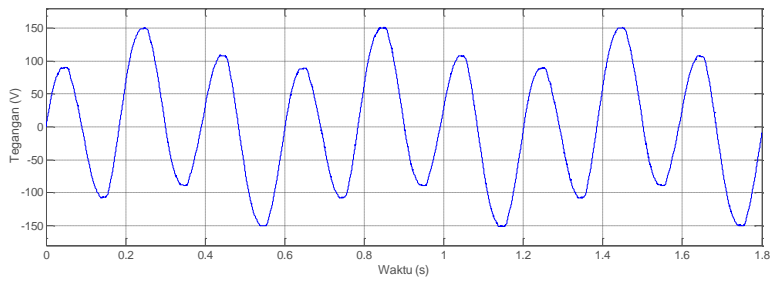
(C_{series} 30 μ F + C_{shunt} 70 μ F) pada trafo M, untuk tegangan sumber 10%-150% ($step$ 11 V) terhadap tegangan rating trafo tidak memunculkan respon feroresonansi sama sekali. Di samping itu, hal yang serupa juga terjadi pada pengujian konfigurasi seri-paralel C_{series} 20 μ F + C_{shunt} 30 μ F dan C_{series} 10 μ F + C_{shunt} 20 μ F di kedua trafo, tegangan sumber sudah mencapai 150% terhadap tegangan rating trafo namun tetap tidak memunculkan respon feroresonansi. Perubahan c_{series} lebih signifikan daripada c_{shunt}

Mode subharmonic juga dapat muncul pada perbandingan C_{series} dan C_{shunt} yang sama, yaitu C_{series} 50 μ F + C_{shunt} 50 μ F dengan trafo M. Mode subharmonic ini muncul hanya pada saat tegangan sumbernya 143 V (130% tegangan rating trafo). Akan tetapi, trafo M dengan konfigurasi C_{series} 10 μ F + C_{shunt} 10 μ F tidak memunculkan respon feroresonansi sampai tegangan sumber 165 V (150% V_{rated}).

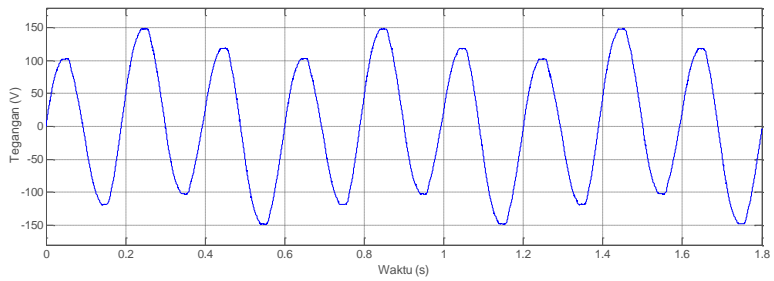
Gambar 4.22 terlihat puncak amplitude gelombang paling tinggi hampir bernilai sama. Hal ini karena tegangan RMS trafo yang terukur dari beda tegangan sumber tersebut tidak jauh berbeda. Pengukuran menunjukkan V_{trafo} konfigurasi C_{series} 70 μ F dan C_{shunt} 30 μ F di tegangan sumber 88 V (80% V_{rated}) adalah 83 V. Sedangkan, V_{trafo} konfigurasi C_{series} 50 μ F dan C_{shunt} 50 μ F di tegangan sumber 143 V (130% V_{rated} trafo) adalah 85.7 V. Sehingga untuk mendapatkan respon feroresonansi yang hampir serupa dari konfigurasi seri-paralel $C_{series}=C_{shunt}$, diperlukan tegangan sumber lima tingkat diatas tegangan sumber konfigurasi seri-paralel $C_{series} > C_{shunt}$. Namun pada seluruh pengujian yang dilakukan pada trafo H dengan konfigurasi seri-paralel, mode subharmonic tidak ditemukan. Hal ini dikarenakan perbandingan C_{series} - C_{shunt} paling besar yang dicoba di pengujian trafo H (30:20) tidak sejauh perbandingan C_{series} - C_{shunt} di pengujian trafo M (70:30).



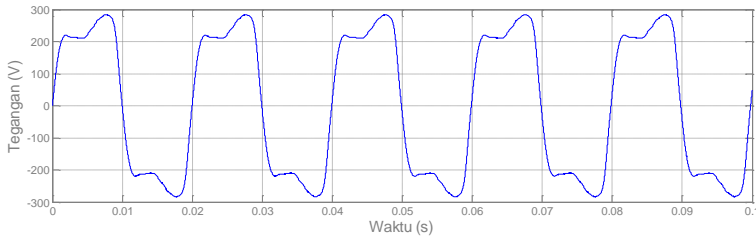
(a)



(b)

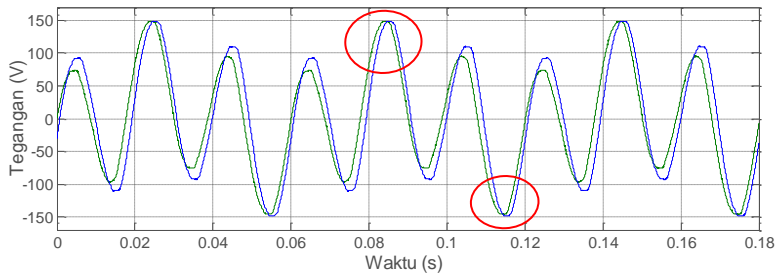


(c)



(d)

Gambar 4. 21 Bentuk respon feroresonansi gelombang tegangan transformator M dihubungkan dengan C_{series} 70 μ F dan C_{shunt} 30 μ F di tegangan sumber (a) 88 V, (b) 99 V, (c) 110 V, (d) 154 V.



Gambar 4. 22 Bentuk respon feroresonansi gelombang tegangan transformator M dengan: a). Konfigurasi seri-paralel C_{series} 70 μ F dan C_{shunt} 30 μ F di tegangan sumber 88 V (Hijau) b). Konfigurasi seri-paralel C_{series} 50 μ F dan C_{shunt} 50 μ F di tegangan sumber 143 V (Biru).

4.3 Spektrum Harmonisa dan besar THD dalam feroresonansi

Bentuk gelombang tegangan transformator hasil feroresonansi yang terekam diolah menggunakan *fast fourier transform* (FFT) untuk mendapatkan spektrum harmonisa. Spektrum harmonisa berdasarkan hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.1 – 4.2 untuk kondisi normal (tanpa kapasitor) pada trafo H dan trafo M. Tabel 4.3 – 4.6 untuk kondisi feroresonansi trafo H dengan konfigurasi seri. Tabel 4.7 – 4.10 untuk kondisi feroresonansi trafo M dengan konfigurasi seri. Tabel 4.11 – 4.12 untuk kondisi feroresonansi trafo H dengan konfigurasi seri-paralel, sedangkan Tabel 4.13 – 4.16 untuk kondisi feroresonansi trafo M dengan konfigurasi seri-paralel. Spektrum harmonisa tersebut memuat amplitudo

(V) dari frekuensi harmonisa yang muncul (Hz) untuk seluruh variasi kapasitansi dan tegangan sumber yang diberikan.

Spektrum harmonisa di kedua trafo dengan kondisi normal terlihat hanya didominasi oleh frekuensi fundamental sistem (50 Hz) meskipun tegangan sumber dinaikkan hingga sekitar 165 V (melebihi tegangan rating transformator). Hal ini dapat dilihat dengan besar grafik batang pada setiap kotak nilai dalam satu kolom secara mudah. Grafik batang tersebut memiliki karakteristik yang cenderung tidak nampak pada kotak nilai frekuensi non-fundamental (akibat nilai yang terlalu kecil terhadap nilai frekuensi fundamental). Peningkatan tegangan sumber seakan tidak berpengaruh terhadap frekuensi genap, sebagaimana amplitudonya bernilai sekitar nol untuk seluruh variasi tegangan sumber.

Pada pengujian dengan trafo H dengan kapasitansi 10 μF (ditunjukkan pada Tabel 4.3) frekuensi ganjil bernilai cukup signifikan terhadap frekuensi fundamental. Seiring dengan peningkatan tegangan sumber (11 V – 77 V), amplitudo frekuensi ganjil tersebut cenderung mengalami peningkatan seperti ditemui pada pengujian kondisi normal. Frekuensi ke-3 (150 Hz) dan ke-5 (250 Hz) naik sangat signifikan ketika tegangan sumber bernilai 88 V hingga 110 V. Amplitudo frekuensi genap bernilai sekitar nol untuk semua variasi tegangan sumber.

Pada variasi kapasitansi lainnya konfigurasi seri seperti ditunjukkan pada Tabel 4.4 – 4.10, dan konfigurasi seri-paralel pada Tabel 4.11 – 4.14 frekuensi ganjil turut meningkat seiring dengan tegangan sumber yang bertambah. Frekuensi ganjil dengan amplitudo tertinggi ke terendah berada pada frekuensi berturut-turut, yaitu 150 Hz, 250 Hz, 350 Hz, dan 450 Hz. Amplitudo frekuensi genap bernilai sekitar nol untuk semua variasi tegangan sumber seperti ditemui pada pengujian-pengujian sebelumnya.

Tabel 4.15 dan 4.16 menunjukkan adanya frekuensi selain kelipatan 50 Hz. Amplitudo tegangan muncul di frekuensi 17 Hz muncul sebelum frekuensi fundamental. Hal ini menunjukkan tegangan trafo tersebut termasuk mode feroresonansi subharmonic. Mode subharmonic memiliki karakteristik muncul amplitudo tegangan di f_0 , $f_0/3$, sampai f_0/n . Pada frekuensi 83 Hz juga muncul amplitudo tegangan namun besarnya lebih kecil dari 17 Hz. Amplitudo tegangan pada mode subharmonic muncul di kelipatan 100 dari 17 Hz dan 83 Hz. Namun pada table 4.16 di kolom tegangan 154 V, amplitudo tegangan kembali ke frekuensi ganjil (mode fundamental).

Berdasarkan spektrum harmonisa yang diperoleh, mode fundamental dapat dilihat kemunculan amplitude tegangan frekuensi non-fundamental yang hanya didominasi di frekuensi ganjil. Sementara, mode subharmonic dapat dilihat dari munculnya amplitude tegangan di frekuensi f_0 , $f_0/3$, sampai f_0/n . Kemunculan mode subharmonic dalam pengujian ini, didukung oleh variasi tegangan pada konfigurasi seri-paralel. Karakteristik feroresonansi yang sensitif terhadap kondisi awal parameter sistem (injeksi variasi tegangan sumber) dan kombinasi *Cseries- Cshunt* yang diaplikasikan ke transformator dapat menimbulkan mode-mode feroresonansi.

Besar persentase THD dihitung dengan Persamaan 3.7. Besar THD merepresentasikan adanya gelombang sinusoidal di frekuensi selain 50 Hz. Semakin besar THD maka semakin buruk suatu gelombang. Pada pengujian trafo H dengan kapasitor 10 μF konfigurasi seri, tegangan 11 V – 77 V memiliki besar THD melebihi 5 % (batas harmonisa sinusoidal). Hal ini terjadi akibat noise tegangan sumber dan alat akuisisi data. Akan tetapi, besar THD naik signifikan di tegangan 88 V - 110 V. Hal ini didukung oleh munculnya mode fundamental di tegangan primer trafo (Gambar 4.6).

Dalam konfigurasi seri, THD terbesar 28.25 % diperoleh dari pengujian trafo H dengan kapasitor 10 μF di tegangan sumber 110 V. Namun di trafo dan tegangan sumber yang sama, besar THD fluktuatif seiring bertambahnya nilai kapasitansi (Tabel 4.3 – 4.7). Hasil yang berbeda ditemukan pada pengujian trafo M konfigurasi seri. Tabel 4.7 – 4.11 menunjukkan besar THD sedikit meningkat seiring bertambahnya nilai kapasitansi. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin besar kapasitansi maka tidak berarti kecenderungan kenaikan THD menjadi lebih signifikan (curam). Namun, besar kapasitansi menyebabkan fluktuasi nilai THD (ditemui pada awal pemberian tegangan sumber) berkurang.

Dalam konfigurasi seri-paralel, THD terbesar 36.55 % diperoleh dari pengujian trafo M dengan *Cseries* 70 μF dan *Cshunt* 30 μF di tegangan sumber 88 V. Hal ini didukung oleh munculnya mode subharmonic sebagai bentuk respon feroresonansi. Tabel 4.16 menunjukkan frekuensi non-fundamental sub kelipatan (f_0/n) lebih banyak muncul dari pada frekuensi non-fundamental n-ganjil (f_0 , $3f_0$, $5f_0$). Sehingga, mode subharmonic lebih berbahaya daripada mode fundamental karena gelombangnya lebih banyak mengandung frekuensi non-fundamental.

Tabel 4. 1 Spektrum harmonisa transformator H kondisi normal (tanpa kapasitor = 0 uF)

Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)														
	11 V	22 V	33 V	44 V	55 V	66 V	77 V	88 V	99 V	110 V	121 V	132 V	143 V	154 V	165 V
50	16.67	31.58	46.82	62.86	78.06	94.30	110.61	124.97	140.83	156.58	172.19	189.84	204.24	219.09	234.62
100	0.03	0.07	0.12	0.17	0.20	0.17	0.16	0.64	0.23	0.79	0.32	0.20	0.11	0.13	0.25
150	0.08	0.14	0.31	0.47	0.46	0.66	0.65	0.88	1.06	1.16	1.54	1.62	1.77	1.92	1.96
200	0.00	0.03	0.04	0.07	0.11	0.07	0.06	0.24	0.07	0.31	0.14	0.08	0.06	0.07	0.10
250	0.19	0.23	0.40	0.57	0.55	1.01	1.21	0.94	1.55	1.52	2.05	2.61	2.73	2.71	2.72
300	0.00	0.02	0.02	0.03	0.05	0.04	0.03	0.09	0.04	0.10	0.07	0.03	0.03	0.03	0.09
350	0.10	0.06	0.17	0.25	0.18	0.51	0.66	0.32	0.65	0.51	0.75	1.12	1.38	1.35	1.06
400	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.07	0.03	0.07	0.04	0.03	0.01	0.01	0.05
450	0.02	0.02	0.04	0.06	0.05	0.12	0.14	0.04	0.16	0.05	0.13	0.28	0.37	0.47	0.38
500	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.01	0.05	0.03	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02	0.06
THD %	1.38	0.93	1.18	1.27	1.00	1.41	1.39	1.20	1.43	1.38	1.57	1.73	1.74	1.65	1.51

Tabel 4. 2 Spektrum harmonisa transformator M kondisi normal (tanpa kapasitor = 0 uF)

Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)														
	11 V	22 V	33 V	44 V	55 V	66 V	77 V	88 V	99 V	110 V	121 V	132 V	143 V	154 V	165 V
50	15.46	30.98	46.63	63.01	78.35	93.82	109.61	125.36	141.39	156.28	171.50	187.00	202.42	219.31	232.45
100	0.02	0.06	0.05	0.03	0.06	0.16	0.07	0.20	0.07	0.17	0.28	0.11	0.15	0.10	0.45
150	0.19	0.27	0.45	0.51	0.54	0.64	0.76	0.90	0.91	1.20	1.40	1.36	1.37	1.45	1.22
200	0.01	0.02	0.02	0.00	0.01	0.07	0.03	0.08	0.04	0.02	0.07	0.04	0.06	0.02	0.23
250	0.17	0.30	0.47	0.76	0.95	1.08	1.27	1.40	1.71	1.86	2.01	2.32	2.54	2.51	1.89
300	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.02	0.05	0.00	0.04	0.05	0.08	0.03	0.03	0.12
350	0.09	0.13	0.25	0.39	0.49	0.55	0.69	0.64	0.86	0.81	0.95	1.13	1.41	1.37	0.72
400	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.03	0.01	0.04	0.04	0.05	0.03	0.03	0.09
450	0.03	0.04	0.09	0.13	0.17	0.16	0.21	0.19	0.27	0.23	0.23	0.35	0.48	0.52	0.21
500	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.03	0.01	0.04	0.03	0.02	0.01	0.02	0.08
THD %	1.79	1.39	1.52	1.60	1.55	1.48	1.50	1.44	1.51	1.52	1.55	1.57	1.60	1.48	1.05

Tabel 4. 3 Spektrum harmonisa transformator H dengan kapasitor 10 uF konfigurasi seri

Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)									
	11 V	22 V	33 V	44 V	55 V	66 V	77 V	88 V	99 V	110 V
50	5.72	24.22	49.99	69.88	89.42	108.78	135.36	158.27	163.39	169.76
100	0.03	0.05	0.70	0.50	0.08	0.11	0.05	0.18	0.44	0.03
150	0.40	1.44	2.89	4.09	5.30	6.99	12.33	27.80	33.58	45.42
200	0.00	0.02	0.16	0.14	0.03	0.05	0.06	0.13	0.26	0.04
250	0.11	0.40	0.03	0.70	1.28	1.78	2.84	6.94	8.32	14.91
300	0.00	0.01	0.04	0.03	0.01	0.04	0.05	0.10	0.14	0.04
350	0.10	0.16	0.22	0.35	0.57	0.72	0.85	2.43	1.74	3.67
400	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.07	0.08	0.02
450	0.02	0.03	0.05	0.12	0.16	0.17	0.35	0.53	0.23	0.78
500	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.06	0.06	0.03
THD %	7.44	6.19	5.98	6.00	6.14	6.67	9.37	18.18	21.20	28.25

Tabel 4. 4 Spektrum harmonisa transformator H dengan kapasitor 20 uF konfigurasi seri

Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)									
	11 V	22 V	33 V	44 V	55 V	66 V	77 V	88 V	99 V	110 V
50	29.44	46.96	63.55	80.15	97.06	118.29	202.74	209.89	215.17	219.84
100	0.06	0.02	0.15	0.21	0.19	0.04	0.07	0.16	0.29	0.09
150	0.76	1.40	1.54	2.04	2.70	4.09	8.72	44.10	47.56	52.19
200	0.02	0.01	0.07	0.09	0.08	0.02	0.04	0.11	0.21	0.17
250	0.16	0.38	0.31	0.43	0.59	0.91	8.72	9.82	9.47	10.19
300	0.02	0.01	0.04	0.06	0.05	0.02	0.03	0.07	0.12	0.13
350	0.05	0.15	0.11	0.11	0.22	0.38	1.45	0.69	0.64	1.12
400	0.01	0.01	0.03	0.04	0.04	0.02	0.02	0.04	0.07	0.08
450	0.02	0.06	0.03	0.03	0.06	0.16	0.08	0.39	0.32	0.30
500	0.01	0.01	0.03	0.04	0.03	0.02	0.03	0.02	0.05	0.04
THD %	2.66	3.11	2.50	2.62	2.86	3.56	19.59	21.53	22.54	24.20

Tabel 4. 5 Spektrum harmonisa transformator H dengan kapasitor 30 uF konfigurasi seri

Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)									
	11 V	22 V	33 V	44 V	55 V	66 V	77 V	88 V	99 V	110 V
50	27.85	44.45	59.86	75.52	93.01	111.81	133.58	239.02	246.44	251.83
100	0.00	0.07	0.16	0.09	0.02	0.08	0.13	0.33	0.47	0.48
150	0.53	0.90	1.12	1.62	2.02	2.58	3.82	44.16	47.10	51.78
200	0.01	0.03	0.06	0.04	0.01	0.03	0.05	0.18	0.27	0.30
250	0.15	0.22	0.25	0.25	0.39	0.45	0.51	7.05	6.26	6.38
300	0.01	0.02	0.04	0.04	0.01	0.00	0.03	0.08	0.10	0.15
350	0.07	0.12	0.11	0.21	0.40	0.45	0.43	0.48	0.83	0.62
400	0.01	0.01	0.03	0.03	0.00	0.01	0.01	0.04	0.08	0.10
450	0.03	0.04	0.01	0.05	0.10	0.13	0.15	0.49	0.42	0.39
500	0.00	0.01	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.03	0.06	0.08
THD %	2.01	2.10	1.95	2.19	2.25	2.38	2.91	18.71	19.29	20.72

Tabel 4. 6 Spektrum harmonisa transformator H dengan kapasitor 50 uF konfigurasi seri

Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)									
	11 V	22 V	33 V	44 V	55 V	66 V	77 V	88 V	99 V	110 V
50	23.83	40.46	57.26	72.72	89.80	105.56	123.08	148.35	275.55	277.66
100	0.02	0.00	0.13	0.01	0.06	0.26	0.27	0.01	0.31	0.35
150	0.23	0.46	0.82	1.08	1.21	1.36	1.86	3.25	58.44	63.68
200	0.01	0.00	0.06	0.02	0.05	0.09	0.12	0.03	0.47	0.38
250	0.11	0.21	0.41	0.58	0.67	0.62	0.75	1.03	10.15	11.03
300	0.00	0.00	0.02	0.02	0.04	0.06	0.08	0.02	0.31	0.24
350	0.09	0.18	0.28	0.37	0.38	0.28	0.31	0.79	2.10	2.88
400	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.04	0.05	0.02	0.20	0.15
450	0.02	0.04	0.08	0.09	0.10	0.06	0.09	0.21	0.66	1.08
500	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.00	0.16	0.13
THD %	1.15	1.34	1.70	1.76	1.60	1.47	1.67	2.37	21.54	23.31

Tabel 4. 7 Spektrum harmonisa transformator M dengan kapasitor 20 uF konfigurasi seri

Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)									
	11 V	22 V	33 V	44 V	55 V	66 V	77 V	88 V	99 V	110 V
50	20.31	37.59	55.53	74.31	93.45	119.14	209.57	215.25	220.07	220.44
100	0.01	0.03	0.07	0.01	0.03	0.10	0.46	0.38	0.18	0.55
150	0.15	0.35	0.67	1.15	1.76	3.27	40.92	43.65	47.53	42.12
200	0.01	0.02	0.02	0.00	0.02	0.04	0.20	0.19	0.11	0.31
250	0.13	0.23	0.46	0.58	0.73	0.62	6.80	5.97	5.60	2.95
300	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.03	0.10	0.11	0.06	0.12
350	0.09	0.15	0.27	0.42	0.48	0.48	0.80	1.15	1.70	0.38
400	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.05	0.04	0.04	0.10
450	0.03	0.06	0.10	0.14	0.18	0.19	0.27	0.18	0.34	0.09
500	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.04	0.03	0.08
THD %	1.08	1.21	1.56	1.84	2.11	2.83	19.80	20.48	21.76	19.16

Tabel 4. 8 Spektrum harmonisa transformator M dengan kapasitor 30 uF konfigurasi seri

Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)									
	11 V	22 V	33 V	44 V	55 V	66 V	77 V	88 V	99 V	110 V
50	18.38	35.54	52.50	70.08	87.42	106.20	239.71	246.48	251.69	253.75
100	0.03	0.05	0.03	0.02	0.22	0.31	0.30	0.21	0.18	0.30
150	0.13	0.24	0.47	0.82	1.12	1.65	35.64	41.82	48.07	50.76
200	0.01	0.02	0.01	0.01	0.10	0.13	0.31	0.18	0.14	0.29
250	0.13	0.24	0.58	0.81	0.58	0.55	3.20	3.63	4.18	3.96
300	0.00	0.01	0.01	0.01	0.06	0.09	0.25	0.14	0.04	0.14
350	0.08	0.13	0.36	0.48	0.17	0.06	0.88	1.14	0.95	0.97
400	0.00	0.01	0.01	0.00	0.04	0.06	0.14	0.10	0.02	0.11
450	0.03	0.06	0.10	0.15	0.05	0.05	0.45	0.36	0.88	0.96
500	0.00	0.01	0.01	0.01	0.04	0.05	0.11	0.08	0.03	0.08
THD %	1.10	1.05	1.59	1.80	1.49	1.67	14.95	17.04	19.18	20.07

Tabel 4. 9 Spektrum harmonisa transformator M dengan kapasitor 50 uF konfigurasi seri

Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)									
	11 V	22 V	33 V	44 V	55 V	66 V	77 V	88 V	99 V	110 V
50	17.57	33.96	50.32	67.18	84.26	101.29	120.68	273.12	261.29	272.38
100	0.00	0.03	0.10	0.06	0.12	0.15	0.17	0.29	0.81	0.22
150	0.09	0.20	0.29	0.59	0.72	0.98	1.49	56.98	40.21	62.18
200	0.00	0.01	0.04	0.04	0.05	0.06	0.07	0.27	0.68	0.45
250	0.14	0.27	0.47	0.73	0.87	1.01	1.15	11.01	2.00	9.96
300	0.00	0.01	0.03	0.02	0.03	0.04	0.04	0.14	0.28	0.29
350	0.09	0.16	0.22	0.41	0.47	0.52	0.63	3.04	0.94	2.96
400	0.00	0.01	0.02	0.01	0.03	0.04	0.04	0.12	0.22	0.23
450	0.04	0.06	0.05	0.12	0.14	0.16	0.19	1.10	0.48	0.52
500	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.02	0.02	0.12	0.19	0.16
THD %	1.08	1.10	1.21	1.54	1.48	1.50	1.66	21.28	15.42	23.15

Tabel 4. 10 Spektrum harmonisa transformator M dengan kapasitor 100 uF konfigurasi seri

Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)									
	11 V	22 V	33 V	44 V	55 V	66 V	77 V	88 V	99 V	110 V
50	19.38	33.19	49.25	65.75	82.00	97.73	115.46	134.72	158.77	301.52
100	0.02	0.00	0.09	0.04	0.03	0.26	0.19	0.12	0.04	0.59
150	0.14	0.19	0.35	0.46	0.54	0.68	0.87	1.16	2.51	73.65
200	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.09	0.07	0.04	0.01	0.50
250	0.13	0.29	0.35	0.53	0.66	0.44	0.81	0.97	1.09	11.87
300	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.07	0.04	0.02	0.00	0.30
350	0.08	0.19	0.21	0.37	0.45	0.23	0.46	0.67	0.80	4.65
400	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.05	0.04	0.04	0.02	0.14
450	0.04	0.07	0.07	0.14	0.18	0.02	0.16	0.32	0.31	2.92
500	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.04	0.03	0.02	0.01	0.08
THD %	1.11	1.20	1.11	1.23	1.19	0.91	1.13	1.26	1.80	24.81

Tabel 4. 11 Spektrum harmonisa transformator H dengan kapasitor C_{series} 20 μ F dan C_{shunt} 10 μ F (konfigurasi seri-paralel)

Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)														
	11 V	22 V	33 V	44 V	55 V	66 V	77 V	88 V	99 V	110 V	121 V	132 V	143 V	154 V	165 V
50	22.64	34.22	45.35	56.20	66.24	75.95	89.46	99.49	112.93	127.01	239.19	241.82	245.33	246.59	248.59
100	0.00	0.03	0.01	0.02	0.16	0.19	0.12	0.28	0.03	0.06	0.10	0.70	0.90	0.91	0.92
150	0.43	0.65	0.85	1.11	1.08	1.17	1.81	1.98	2.49	3.34	41.58	40.93	44.15	44.93	45.63
200	0.00	0.01	0.00	0.01	0.07	0.09	0.05	0.11	0.01	0.02	0.12	0.36	0.43	0.41	0.42
250	0.09	0.13	0.20	0.24	0.23	0.22	0.39	0.32	0.48	0.40	6.48	5.29	5.56	5.71	5.83
300	0.00	0.01	0.00	0.00	0.04	0.06	0.03	0.07	0.01	0.00	0.09	0.13	0.13	0.15	0.16
350	0.06	0.11	0.19	0.26	0.12	0.04	0.42	0.22	0.65	0.71	0.85	0.62	0.66	1.52	2.37
400	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.04	0.01	0.04	0.00	0.02	0.06	0.10	0.13	0.12	0.13
450	0.02	0.02	0.06	0.08	0.04	0.03	0.12	0.04	0.20	0.21	0.87	0.30	0.28	0.95	1.12
500	0.00	0.01	0.00	0.01	0.03	0.04	0.02	0.04	0.02	0.01	0.06	0.08	0.09	0.10	0.11
THD %	1.97	1.96	1.98	2.07	1.70	1.60	2.13	2.05	2.33	2.71	17.60	17.07	18.15	18.39	18.54

Tabel 4. 12 Spektrum harmonisa transformator H dengan kapasitor C_{series} 30 μ F dan C_{shunt} 20 μ F (konfigurasi seri-paralel)

Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)														
	11 V	22 V	33 V	44 V	55 V	66 V	77 V	88 V	99 V	110 V	121 V	132 V	143 V	154 V	165 V
50	16.92	27.43	37.20	46.58	55.69	65.70	73.88	83.71	95.02	103.61	115.01	125.16	136.80	275.38	274.56
100	0.00	0.01	0.01	0.04	0.10	0.10	0.14	0.19	0.08	0.23	0.01	0.21	0.20	0.07	0.24
150	0.16	0.28	0.41	0.53	0.62	0.77	0.94	1.02	1.22	1.20	1.63	1.82	2.38	65.83	66.90
200	0.00	0.00	0.01	0.03	0.05	0.05	0.08	0.08	0.03	0.10	0.00	0.09	0.08	0.08	0.20
250	0.07	0.16	0.23	0.27	0.29	0.36	0.32	0.40	0.56	0.45	0.69	0.62	0.60	16.17	15.33
300	0.00	0.00	0.01	0.02	0.03	0.03	0.05	0.05	0.01	0.06	0.01	0.05	0.05	0.08	0.15
350	0.06	0.13	0.19	0.22	0.19	0.26	0.17	0.24	0.61	0.30	0.81	0.58	0.73	5.69	5.06
400	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.01	0.05	0.00	0.05	0.04	0.06	0.14
450	0.02	0.04	0.05	0.05	0.05	0.07	0.04	0.06	0.16	0.06	0.21	0.16	0.21	2.75	2.48
500	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.00	0.04	0.02	0.02	0.02	0.05	0.11
THD %	1.12	1.27	1.36	1.38	1.30	1.37	1.38	1.37	1.56	1.29	1.70	1.62	1.88	24.72	25.08

Tabel 4. 13 Spektrum harmonisa transformator M dengan kapasitor C_{series} 20 μ F dan C_{shunt} 10 μ F (konfigurasi seri-paralel)

Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)														
	11 V	22 V	33 V	44 V	55 V	66 V	77 V	88 V	99 V	110 V	121 V	132 V	143 V	154 V	165 V
50	12.89	24.18	34.51	47.22	59.07	70.94	82.10	95.63	109.57	238.57	240.36	246.61	249.65	251.54	253.64
100	0.03	0.06	0.14	0.12	0.00	0.12	0.15	0.19	0.07	0.06	0.67	0.18	0.15	0.01	0.18
150	0.07	0.13	0.21	0.38	0.51	0.71	0.81	1.24	1.72	39.53	37.17	45.69	49.35	53.05	58.20
200	0.01	0.02	0.06	0.05	0.01	0.05	0.06	0.07	0.02	0.02	0.31	0.23	0.13	0.05	0.17
250	0.07	0.13	0.08	0.23	0.46	0.44	0.49	0.29	0.63	4.69	2.97	4.29	4.59	5.57	7.02
300	0.01	0.01	0.03	0.03	0.01	0.02	0.03	0.04	0.01	0.04	0.14	0.14	0.08	0.10	0.10
350	0.04	0.07	0.05	0.13	0.36	0.31	0.31	0.41	0.65	1.42	0.45	1.02	0.90	1.08	2.45
400	0.00	0.01	0.03	0.02	0.00	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.12	0.09	0.07	0.09	0.06
450	0.01	0.02	0.03	0.04	0.10	0.09	0.08	0.12	0.19	0.68	0.14	0.60	0.88	1.22	2.17
500	0.00	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.09	0.08	0.06	0.06	0.07
THD %	0.88	0.86	0.82	1.01	1.32	1.28	1.23	1.42	1.78	16.70	15.52	18.61	19.86	21.21	23.15

Tabel 4. 14 Spektrum harmonisa transformator M dengan kapasitor C_{series} 30 μ F dan C_{shunt} 20 μ F (konfigurasi seri-paralel)

Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)														
	11 V	22 V	33 V	44 V	55 V	66 V	77 V	88 V	99 V	110 V	121 V	132 V	143 V	154 V	165 V
50	10.95	20.85	30.06	40.01	50.00	60.25	69.49	79.87	90.31	100.69	112.41	125.32	140.90	272.46	275.68
100	0.01	0.00	0.09	0.09	0.08	0.02	0.14	0.12	0.13	0.15	0.07	0.04	0.04	0.10	0.17
150	0.05	0.10	0.16	0.22	0.37	0.41	0.51	0.67	0.90	1.01	1.27	1.79	3.06	67.10	69.12
200	0.00	0.00	0.04	0.04	0.03	0.01	0.07	0.05	0.05	0.06	0.03	0.02	0.02	0.10	0.16
250	0.08	0.17	0.13	0.21	0.35	0.52	0.42	0.60	0.72	0.79	0.96	0.99	0.70	16.73	18.00
300	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	0.04	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.08	0.09
350	0.05	0.13	0.03	0.10	0.23	0.39	0.25	0.41	0.54	0.56	0.71	0.85	0.88	7.30	8.37
400	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.06	0.05
450	0.02	0.04	0.02	0.02	0.05	0.12	0.07	0.12	0.15	0.16	0.26	0.30	0.32	3.35	4.26
500	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.05	0.04
THD %	1.02	1.15	0.77	0.84	1.14	1.30	1.04	1.26	1.43	1.41	1.57	1.78	2.32	25.55	26.13

Tabel 4. 15 Spektrum harmonisa transformator M dengan kapasitor C_{series} 50 μ F dan C_{shunt} 50 μ F (konfigurasi seri-paralel)

Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)														
	11 V	22 V	33 V	44 V	55 V	66 V	77 V	88 V	99 V	110 V	121 V	132 V	143 V	154 V	165 V
17													27.54		
50	8.79	16.77	25.02	33.02	41.32	48.98	57.00	65.09	72.54	81.92	90.35	98.34	119.15	115.70	124.16
83													2.28		
100	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.09	0.18	0.08	0.01	0.06		0.08	0.16
117													2.23		
150	0.03	0.07	0.09	0.12	0.16	0.21	0.26	0.33	0.37	0.42	0.50	0.61	2.03	0.82	1.05
183													0.27		
200	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.04	0.07	0.01	0.01	0.02		0.03	0.06
216													0.26		
250	0.07	0.13	0.21	0.30	0.36	0.45	0.55	0.56	0.40	0.77	0.89	1.01	0.96	0.99	0.95
283													0.03		
300	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.05	0.01	0.01	0.01		0.02	0.04
317													0.05		
350	0.05	0.10	0.17	0.23	0.31	0.37	0.44	0.46	0.25	0.67	0.74	0.78	0.66	0.86	0.84
383													0.02		
400	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02		0.02	0.02
417													0.02		
450	0.01	0.02	0.04	0.07	0.08	0.01	0.15	0.13	0.02	0.22	0.26	0.26	0.20	0.29	0.23
483													0.01		
500	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.03	0.02		0.02	0.06
THD %	1.01	1.11	1.13	1.21	1.22	1.28	1.35	1.24	0.82	1.37	1.42	1.47	23.36	1.36	1.35

Tabel 4. 16 Spektrum harmonisa transformator M dengan kapasitor C_{series} 70 μ F dan C_{shunt} 30 μ F (konfigurasi seri-paralel)

Frekuensi (Hz)	Amplitudo (V)													
	11 V	22 V	33 V	44 V	55 V	66 V	77 V	88 V	99 V	110 V	121 V	132 V	143 V	154 V
17								37.21	30.55	22.22				
50	11.47	23.02	33.93	45.67	57.26	69.31	79.88	106.99	117.70	126.42	128.59	142.60	155.22	289.36
83								2.17	2.30	2.38				
100	0.02	0.02	0.06	0.09	0.06	0.04	0.11				0.01	0.07	0.53	0.86
117								2.69	2.37	2.05				
150	0.11	0.14	0.20	0.28	0.38	0.42	0.60	1.72	2.06	2.31	1.23	1.84	2.32	75.47
183								0.35	0.26	0.21				
200	0.00	0.01	0.03	0.04	0.03	0.01	0.05				0.00	0.04	0.19	0.64
216								0.20	0.20	0.32				
250	0.12	0.27	0.29	0.41	0.69	0.89	0.91	1.23	1.32	1.42	1.69	1.73	0.57	14.08
283								0.05	0.02	0.05				
300	0.00	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.03				0.01	0.02	0.14	0.36
317								0.03	0.03	0.05				
350	0.05	0.09	0.06	0.09	0.23	0.30	0.31	0.31	0.42	0.58	0.59	0.62	0.16	2.30
383								0.05	0.04	0.05				
400	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02				0.01	0.02	0.10	0.18
417								0.02	0.01	0.04				
450	0.04	0.07	0.04	0.07	0.17	0.32	0.25	0.33	0.41	0.61	0.70	0.67	0.20	0.20
483								0.03	0.03	0.03				
500	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02				0.02	0.01	0.07	0.17
THD %	1.51	1.39	1.10	1.15	1.47	1.55	1.47	34.99	26.19	17.89	1.78	1.88	1.59	26.55

BAB 5

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Modul pengujian feroresonansi telah didesain dan diimplementasikan dengan baik untuk menghasilkan suatu kejadian feroresonansi pada transformator. Sehingga, beberapa hal dapat disimpulkan berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, yaitu:

1. Variasi tegangan sumber yang diberikan mampu respon feroresonansi dengan dampak yang bermacam-macam (*overvoltage & overcurrent*). Transformator satu fasa inti M lebih rentan terkena feroresonansi daripada transformator satu fasa inti H. Perbedaan letak *knee point* kurva magnetisasi di kedua trafo mempengaruhi tegangan permulaan feroresonansi. Tegangan permulaan feroresonansi juga berpengaruh pada penambahan nilai kapasitansi, semakin besar nilai kapasitansi semakin besar tegangan permulaan yang dibutuhkan transformator untuk memunculkan feroresonansi.
2. Variasi nilai kapasitansi yang didapatkan dari *Rudenberg' graphical method* terbukti bisa digunakan untuk pendekatan alternatif dalam memunculkan feroresonansi. Variasi kapasitor menunjukkan distorsi gelombang tegangan tranformator H dan M semakin meningkat seiring bertambahnya besar kapasitor.
3. Pada pengujian ini *jump phenomenon* sebagai karakteristik fisik feroresonansi, dapat dijadikan acuan untuk menunjukkan adanya respon feroresonansi. Lonjakan arus transformator akan semakin besar seiring bertambahnya nilai kapasitansi. Dan lonjakan tegangan transformator (*overvoltage*) paling besar ditemukan sesaat setelah *jump phenomenon* terjadi.
4. Konfigurasi seri-paralel melibatkan *Cseries* dan *Cshunt* dalam rangkaian pengujian feroresonansi. Untuk mendapat respon feroresonansi di transformator H dan M, tegangan sumber harus lebih dari sama dengan tegangan rating transformator. Tegangan sumber yang diperlukan berada pada kisaran 1 - 1.5 V_{rated} .
5. Pada tegangan sumber tertentu, *Cseries* dan *Cshunt* dapat diikombinasikan dari *Cthevenin*. Untuk mendapat respon feroresonansi yang sama dengan konfigurasi seri (*Cthevenin*) di transformator H dan M, tegangan sumber di konfigurasi seri memiliki relasi dengan tegangan sumber di konfigurasi seri-paralel. Sehingga konfigurasi seri-paralel

dapat dijadikan pendekatan pada feroresonansi yang terjadi di sistem/lapangan.

6. *Cseries* mempunyai pengaruh yang signifikan daripada *Cshunt*. Pada pengujian ini, bentuk gelombang feroresonansi hanya didapatkan dengan nilai kapasitansi *Cseries* lebih besar dari nilai kapasitansi *Cshunt*. Perubahan signifikan *Cseries-Cshunt* dari 30uF-20uF ke 70uF-30uF dapat menimbulkan mode feroresonansi selain mode fundamental, yaitu mode subharmonic.
7. Mode fundamental mendominasi bentuk gelombang feroresonansi yang muncul dalam pengujian ini. Mode fundamental dengan THD terbesar 28,25 % muncul pada pengujian transformator H dengan kapasitor 10 uF konfigurasi seri. Mode subharmonic muncul pada transformator M dengan konfigurasi seri-paralel (*Cseries* 70 uF dan *Cshunt* 30 uF). Mode subharmonic lebih berbahaya dibandingkan dengan mode fundamental karena mode tersebut mempunyai THD terbesar, yaitu 34.99 % dan frekuensi non-fundamental yang lebih beragam di spektrum harmonisnya (lebih banyak muncul frekuensi non-fundamental seperti $f_0/3, f_0/n$).

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dari studi ini untuk di masa yang akan datang adalah melakukan studi terkait modul pengujian feroresonansi pada transformator tiga fasa. Studi ini merupakan tahapan lanjutan untuk mengetahui karakteristik fisik feroresonansi di transformator tiga fasa. Sehingga dengan adanya studi lebih lanjut tersebut, akan didapatkan kejadian feroresonansi yang lebih mendekati ke kasus feroresonansi yang terjadi di sistem tenaga.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. J. Chapman, *Electric machinery fundamentals*, 4th ed., internat. ed. Boston, Mass.: McGraw-Hill, 2005.
- [2] E. Martinez, G. Antonova, and M. Olguin, "Ferroresonance phenomenon in CFE, its origin and effects," 2013, pp. 450–466.
- [3] P. Ferraci, "Cahier Technique Ferroresonance," *Groupe Schneider's Collect. Tech.*, vol. No.190, Mar. 1998.
- [4] B. L. Tobing, *Peralatan Tegangan Tinggi*. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama, 2013.
- [5] J. A. Corea-Araujo, F. Gonzalez-Molina, J. A. Martinez, F. Castro-Aranda, J. A. Barrado-Rodrigo, and L. Guasch-Pesquer, "Single-phase transformer model validation for ferroresonance analysis including hysteresis," 2015, pp. 1–5.
- [6] M. Wahyudi, *Inisiasi Feroresonansi pada Transformator Tegangan Rendah*, Master Thesis. ITS, 2018.
- [7] K. Andarini, I. M. Y. Negara, and I. G. N. S. Hernanda, *Deteksi Feroresonansi Pada Transformator Tiga Fasa yang Tidak Simetri terhadap Pengaruh dari Perubahan Kapasitansi*, Tugas Akhir. 2017.
- [8] IGN Satriyadi, IMY Negara, D Fahmi, DA Asfani, SS Simamora, *Study on damping reactor installation to address ferroresonance on incoming 20 kV GIS*, International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), 2016
- [9] Preecha Sakarung, Teratam Bunyagul, and Somchai Chatratana, "Investigation and Mitigation of Overvoltage Due to Ferroresonance in the Distribution Network", *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol. 2, No. 3, 2007.
- [10] Z. ALI, *DEVELOPMENT OF NUMERICAL ALGORITHMS FOR FERRORESONANCE MONITORING*, Doctoral Thesis. The University of Manchester, 2015.
- [11] Roy, M., dan Roy, C.K, (2008), "Experiments on Ferroresonance at Various Line Conditions and Its Damping", *IEEE*.
- [12] Milicevic, K. dan Emin, Z., (2014), "Investigation Of Possible Ferroresonance For A Voltage Range; Realisation Of A System Event With A Laboratory Setup", *Int J Circuit Theory Appl*, 41:259–72

- [13] IMY Negara, IGNS Hernanda, Y Afif, M Wahyudi *Ferroresonance characteristics in unsymmetrical flux distribution of 150 KV three phase transformer*, IEEE TENCON Region 10 Conference, p. 78-81, 2017
- [14] M Wahyudi, IMY Negara, DA Asfani, IGNS Hernanda, *Application of wavelet cumulative energy and artificial neural network for classification of ferroresonance signal during symmetrical and unsymmetrical switching of three-phases distribution transformer*, International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS), 2017
- [15] IGNS Hernanda, IMY Negara, DA Asfani, Surya Dwi Kisdarmawan, *Ferroresonance Signal Analysis with Wavelet Transform on 500 kV Transmission Lines Capacitive Voltage Transformers*, Journal on Advanced Research in Electrical Engineering Vol.1(1), 2017
- [16] IGN Satriyadi, IMY Negara, D Fahmi, N Wijayanto, M Wahyudi, *Ferroresonance Characteristics on Capacitive Voltage Transformer Under Lightning Impulse Voltage*, International Review on Modelling and Simulations (IREMOS) vol.9(4), p.306-311, 2016

BIODATA PENULIS



Neisya Islamey Rifma, dilahirkan di Jakarta pada tanggal 26 Februari 1996. Anak pertama dari dua bersaudara. Selama kuliah penulis aktif dalam kegiatan organisasi BEM FTI 2015/2016 sebagai staf departemen social masyarakat. Penulis pernah aktif dalam kegiatan event Teknik Elektro ITS sebagai *organizing committee* 2016. Saat ini penulis aktif sebagai salah satu asisten Laboratorium Tegangan Tinggi Departemen Teknik Elektro

Fakultas Teknologi Elektro ITS. Pendidikan formal yang telah ditempuh yaitu:

1. SD Islam Al-Azhar 27 Cibinong
2. SMP Negeri 5 Bogor
3. SMA Negeri 3 Bogor

Penulis dapat dihubungi pada email: neisyaislamey@gmail.com

Halaman ini sengaja dikosongkan